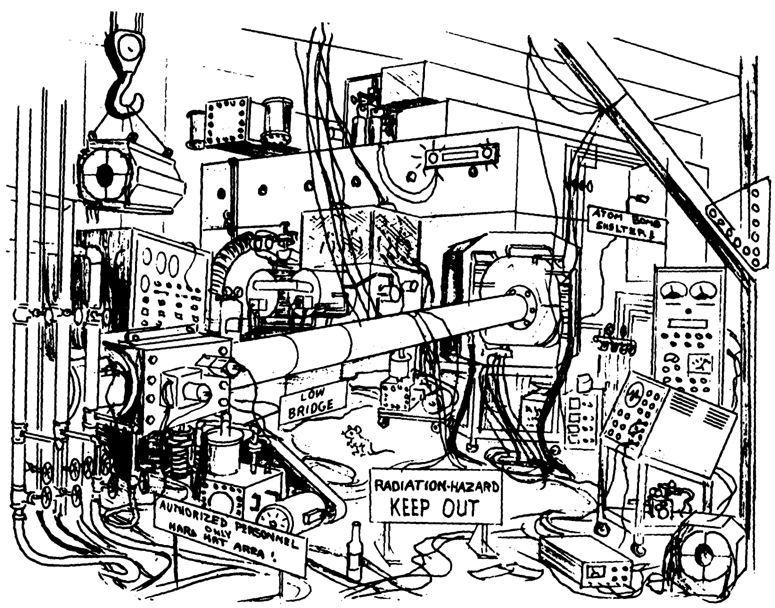
Física Experimental

Paulo Mendes



Departamento de Física
Universidade de Coimbra
COIMBRA
1998

Física Experimental

Como realizar experiências em Física

Paulo Mendes

Departamento de Física
Universidade de Coimbra
Coimbra, 1998

ÍNDICE

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

1

Introdução

1.1 Generalidades. Ciências Experimentais

A palavra "ciência" deriva do latim *scientia* (de *scire*), saber. Embora já tenha englobado todo o saber e conhecimento, actualmente é um subconjunto deste, embora de uma importância e vastidão enormes. Para pôr o assunto deste livro no contexto podemos dividir o conhecimento em quatro categorias:

- ciências experimentais;
- ciências observacionais;
- quasi-ciências;
- não-ciências.

A característica distintiva da ciência experimental é termos algum controlo sobre as condições em que as observações são efectuadas. A física é um dos principais exemplos duma ciência em que se pode regular variáveis experimentais tais como a temperatura, a pressão, etc. Esta capacidade de controlar as condições em que se fazem as observações é uma das razões porque estes assuntos se têm desenvolvido extraordinariamente nos últimos séculos.

A astronomia é um exemplo duma ciência em que se pode fazer medidas mas sem grande controlo sobre a fonte das observações. Por exemplo, a radiação do Sol tem sido observada e estudada, em muitos os comprimentos de onda, com grande detalhe, e tem-se recolhido imensa informação sobre a sua estrutura e a sua química nuclear, mas temos que aceitá-la tal como é. Podem-se desenvolver teorias que, para serem classificadas como científicas, devem ser quantitativas e comparadas com as observações.

As quasi-ciências podem ser representadas por assuntos como a psiquiatria ou a sociologia. As experiências controladas são praticamente inexistentes, e, embora se possa efectuar observações não é possível testá-las com teorias quantitativas. Pode-se fazer modelos de como o cérebro ou a sociedade funciona, mas estes não possuem a objectividade necessária para serem classificados como ciência.

A arte, música ou literatura não têm nenhuma pretensão de serem científicas, e não são menosprezáveis por isso. A ciência e a tecnologia podem ajudar a criar equipamento útil naquelas actividades mas o seu conteúdo é mais artístico do que científico.

1.2 Física

Embora os fenómenos físicos tenham desde sempre suscitado a admiração e despertado a curiosidade dos Homens, remontando à Antiguidade a tentativa de compreensão e previsão da Natureza, a Física, entendida como ramo autónomo da Ciência, é relativamente recente. Com efeito, só no Séc XIX é que a Física se separou das outras ciências. Esta autonomia deve-se ao grande desenvolvimento que a Ciência em geral teve nos séculos XVII, XVIII e XIX e que levou à divisão das Ciências Naturais nos grandes ramos que conhecemos hoje em dia: Física, Química, Biologia (Botânica e Zoologia), Medicina e Engenharias.

A Física é uma das Ciências Naturais, ou seja, é uma das partes da nossa tentativa de compreensão da Natureza. A actividade da Física cinge-se à procura incessante da compreensão e previsão dos fenómenos da Natureza de carácter mais elementar. Não quer isto dizer que os fenómenos estudados na Física sejam elementares e muito simples, antes pelo contrário. A sua complexidade pode ser tal que desafie qualquer tratamento pormenorizado (como por exemplo na termodinâmica ou na dinâmica de galáxias) restando-nos unicamente a possibilidade de estudar grandezas médias que permitam prever o comportamento global dos sistemas estudados, ou a sua simulação com modelos simples na esperança de descobrir as regras que gerem os sistemas completos. Por outro lado o âmbito dos fenómenos estudados na Física é de tal modo vasto que é vulgar dois cientistas ao falar de assuntos dos seus respectivos ramos terem dificuldade em se entender um ao outro.

Em Física estudam-se fenómenos tão diversos que vão desde as partículas elementares como os mesões, leptões, etc. até às mais longínquas galáxias e ao Universo como um todo, passando pelos átomos individuais, agregados cristalinos de átomos, sistemas macroscópicos (líquidos, gases e sólidos), etc.

Quando pretendemos compreender um qualquer fenómeno na natureza, o modo como procedemos, em Física, é seleccionar as características que julgamos serem as essenciais. Por exemplo, os Gregos verificaram que um corpo em movimento acaba por parar e daí deduziram que é necessário uma força para manter um corpo em movimento. Galileu e Newton, observaram o mesmo fenómeno, mas disseram que a paragem do corpo não é uma característica essencial da situação em causa. Depende do atrito; na ausência de atrito o corpo continua a mover-se. Se tentar-mos realizar uma experiência que teste este ponto de vista, verifica-mos que é impossível eliminar completamente o atrito ou outras forças retardadoras, mas podemos tornar essas forças muito pequenas, e, quanto mais pequenas elas forem mais longe vai o corpo antes de parar. É, portanto, razoável acreditar que, no caso limite em que não há forças de atrito, o movimento não se modificará, como é afirmado na primeira lei de Newton.

1.3 Método Experimental

Em qualquer ramo da Ciência o método utilizado para a aquisição de conhecimentos e para a sua sistematização com vista à sua compreensão e futura utilização em sistemas semelhantes é o chamado método experimental. Este consiste fundamentalmente em, face a determinado sistema que se pretende estudar, realizar experiências controladas sobre esse sistema medindo, e registando, as grandezas observáveis e que se supõe determinam o comportamento desse sistema, em seguida procurar encontrar as relações matemáticas (as leis) a que obedecem esses resultados, para de seguida sistematizar e formalizar esses conhecimentos de modo mais geral de maneira a ser possível prever o comportamento de sistemas semelhantes nas mesmas circunstâncias, e, finalmente, comunicar à comunidade científica esses resultados e a respectiva formalização de modo a que outros cientistas possam duplicar os nossos resultados e verificá-los por aplicação a outros sistemas. Resumindo, em primeiro lugar seleccionamos aquilo que consideramos serem as características essenciais da situação física em estudo, em seguida procedemos à generalização das observações realizadas, a teoria, e, a partir da teoria fazemos deduções. As deduções são testadas realizando experiências. Mas, em geral, as deduções referem-se a situações simples e idealizadas, ou mesmo teóricas. Para realizar o teste temos que criar esta situação simples na confusão e complicação do mundo real, o que nem sempre é muito fácil de realizar.

Podemos resumir o funcionamento do método experimental no seguinte algoritmo:

Repetir
  Tirar notas
  Projectar experiência
  Medir a(s) variável(eis) experimental(is)
  Analisar os dados
  Fazer modelo da experiência
  Comparar o modelo com os dados
Até comparação satisfactória
Escrever artigo científico

Nas aulas é ensinada a teoria dos assuntos. O mundo real é descrito em termos das características que as teorias actuais dizem ser essenciais. A tendência geral é referir, nas aulas, só estas características e é bem possível que os alunos se convençam que elas constituem o mundo, em vez de não passarem de uma selecção particular deste. Além disso, geralmente tudo encaixa de modo tão perfeito e suave que facilmente nos esquecemos do génio e esforço que foi necessário para criar esse assunto. O antídoto mais eficaz para este tipo de atitude é ir para o laboratório e ver e sentir as dificuldades do mundo real.

Vemos assim que uma das partes mais importantes da actividade dos físicos é a realização de experiências com os sistemas que se pretende estudar. Com o acumular de experiência adquirida ao longo dos séculos há um certo conjunto de regras, metodologias e comportamentos que se devem adoptar quando se realizam experiências. Neste curso pretende-se apresentar as regras básicas da realização de experiências em Física.

Os trabalhos de laboratório, em qualquer ramo de ensino, são realizados com um dos seguintes objectivos

i) para demonstrar *ideias teóricas* em física,

ii) para criar *familiaridade* com um aparelho,

iii) para treinar *como se fazem experiências*.

Consideremos cada um destes objectivos separadamente.

Ver alguma coisa demonstrada na prática é, quase sempre, uma grande ajuda para a sua compreensão. Por exemplo, a interferência da luz é um conceito que não é intuitivo. A ideia de que dois feixes de luz podem cancelar-se dando origem a escuridão é um bocado difícil de engolir, e a maior parte das pessoas acha útil a realização de uma demonstração visual. Uma demonstração pode ser útil por outra razão—dá uma ideia das ordens de grandeza das coisas. As franjas de interferência estão, geralmente, muito próximas o que indica que o comprimento de onda da luz é pequeno quando comparado com objectos do dia a dia. Mas a demonstração não é nenhum substituto da explicação correcta, que nos leva a entrar em detalhes relativamente à geometria e relações de fase. Por isso o primeiro objectivo, a demonstração de ideias teóricas, é muito útil mas um pouco limitada.

O segundo objectivo pode ser mais importante mas, é necessário dizer exactamente qual é o significado de 'aparelho' neste contexto. É natural que já tenham tido contacto com aparelhos simples, tais como potenciómetros, resistências variáveis, cronómetros, osciloscópios, etc., e a experiência ganha na sua manipulação irá ser sempre muito útil. No entanto, se vier a realizar trabalho científico de qualquer tipo, a gama de instrumentos com que poderá vir a trabalhar é enorme. Seria impossível, e muito pouco razoável, tentar aprender como funcionam todos os instrumentos. O que se deve fazer é ganhar treino no uso de instrumentos *em geral*. Há uma certa atitude mental que um experimentalista deve adoptar quando maneja um instrumento qualquer, e isso ganha-se com experiência. Mas isto é parte do terceiro objectivo, que é o mais importante de todos.

A frase 'como se fazem experiências' pode parecer vaga, tentemos ser mais específicos. Um dos objectivos principais da disciplina de Física Experimental é treinar a

- i) planear uma experiência cuja precisão seja adequada ao fim em vista,
- ii) ter consciência, e providenciar para eliminar, os erros sistemáticos nos métodos e nos instrumentos,
- iii) analisar os resultados de modo a tirar conclusões correctas,
- iv) fazer uma estimativa da precisão do resultado final,
- v) registar as medidas e os cálculos com precisão, clareza e concisamente.

Ou seja, pretende-se treiná-los a ser experimentadores competentes. Naturalmente que será interessante observar como funciona a física.

2

Projectar Experiências

O afirmação "projectar uma experiência" representa todos os passos necessários para completar, de modo bem sucedido, uma experiência de qualquer tipo. O ponto de partida pode mesmo ser uma ideia muito vaga, mas, devemos ter por objectivo terminar com a redacção de um relatório científico para que outras pessoas interessadas no mesmo tipo de trabalho, possam avaliar da sua qualidade, repeti-lo, ou utilizá-lo para outros estudos.

Enquanto estudantes é pouco frequente organizar uma experiência desde o princípio até ao fim devido a limitações no tempo disponível para a sua execução. É, no entanto, muito útil ter um conhecimento deste, não só para enquadrar os nossos esforços, mas também para poder ter um ponto de referência para a nossa vida profissional futura.

2.1 Introdução

A ciência experimental é muito intolerante no que diz respeito a erros. Mesmo que execute 99% do seu procedimento correctamente, o 1% que fizer errado pode destruir completamente todo o bom trabalho efectuado (esta possibilidade de "perdição" pela menor falha é muita vez referida como a "Lei de Murphy" [Matthews, 1997]). Sómente a experiência ganha após a realização de inúmeras experiências (quantas mais melhor), nos permitirá ter a capacidade de reconhecer quais as partes de uma experiência mais sensíveis, por exemplo aquelas mais susceptíveis à ocorrência de erros sistemáticos.

Devemos estar preparados para enfrentar resultados inesperados e que não foram previstos na fase de projecto da experiência, uma vez que a clarividência não faz parte dos requisitos necessários para um bom cientista. Também não devemos tomar atitudes arrogantes pois até agora nenhum cientista disse a última palavra sobre algum assunto científico. A modéstia e honestidade na apreciação e julgamento dos resultados é uma característica muito importante para se poder ser um bom experimentador.

Um outro ponto que iremos abordar em seguida, é a utilização eficiente do tempo disponível para a realização da experiência. Frequentemente estas demoram muito tempo sendo conveniente adoptar uma atitude que procure ir pelo caminho mais rápido para um determinado fim, em vez de fazer as coisas displicentemente de modo aleatório.

2.2 Passos a seguir

Começaremos por indicar os passos necessários, em seguida discutiremos alguns aspectos de cada um e terminaremos com alguns exemplos de aplicação destes princípios a experiências particulares:

1. Escolher um assunto próprio para uma experiência.

2. Descobrir o que se sabe sobre esse assunto.

3. Dispõe do equipamento necessário?

4. Projectar a experiência.

5. Efectuar medidas preliminares.

6. Analisar os dados preliminares.

7. Reformular a experiência se for necessário.

8. Efectuar a experiência.

9. Escrever um relatório científico.

2.3 Os passos detalhadamente

1. A escolha do assunto

Na indústria um assunto particular pode surgir devido à necessidade de resolver um determinado problema de manufactura, tal como a necessidade de aumentar a qualidade ou diminuir o preço de um produto. Nas Universidades a ênfase pode ser em questões mais fundamentais acerca de como funciona a natureza. Um professor nas suas aulas seleccionará experiências ao nível apropriado para os estudantes em causa.

Qualquer que seja o assunto devemos lembrar-nos que irá ser necessário muito tempo e esforço para atingir uma solução satisfactória. É necessário ter a certeza de que estamos dispostos a investir o que for necessário antes de prosseguir. Também é muito importante definir o problema claramente logo desde o início

2. O que se sabe sobre o assunto?

Alguns cientistas sentem que é necessário descobrir tudo o que se sabe sobre um assunto antes de projectar as suas próprias experiências. Esta atitude apresenta o perigo de, ao ler um artigo científico bem escrito, podemos ser levados a pensar que não mais nenhum problema que mereça ser investigado, embora isto só aconteça muito raramente. Quando muito pode-se ter uma resposta apropriada na altura em que o trabalho foi efectuado mas devemos ter presente que a ciência se desenvolve a um ritmo por vezes alucinante.

Muitos cientistas concordam com Sir Edward Bullard quando diz: "Penso que é melhor trabalhar um pouco num assunto antes de ler o que as outras pessoas fizeram. Se ler os artigos de outros cientistas durante vários dias seguidos, entra na sua maneira de pensar e pode perder ideias que, de outro modo, lhe ocorreriam."

Como na maioria das coisas nenhum extremo é bom conselheiro, devemos portanto, mantendo presente estas atitudes, desenvolver um método que se adeque ao nosso temperamento.

3. Dispõe do equipamento necessário?

O equipamento necessário depende enormemente da "grandeza" do problema a ser investigado. Qualquer tentativa para estudar as interacções entre partículas elementares exigirá um grande acelerador, toneladas de electrónica, inúmeros computadores rápidos e um grande número de físicos, engenheiros e técnicos.

Por vezes o equipamento necessário para uma determinada experiência não se encontra disponível porque ainda não foi inventado. Nestes casos é de importância extrema a capacidade de um cientista para desenhar e construir novas peças de equipamento. Dois exemplos de equipamento experimental que foi sendo desenvolvido ao longo do tempo são as bombas de vazio e os detectores de radiação nuclear.

Há duas peças de equipamento universais: tempo e dinheiro, mas quem é que alguma vez dispôs de quantidade suficiente de qualquer deles?

4. Projectar a experiência

Projectar inclui todo o trabalho preliminar para garantir uma elevada probabilidade de sucesso na experiência: a escolha do equipamento, condições de medição, estimativa da precisão a atingir, controlo de variáveis indesejadas, etc.

Nesta fase deve-se sempre ter presente a possibilidade de ocorrência de erros sistemáticos. Pode ser necessário fazer algumas medidas simples para testar a sensibilidade dos aparelhos a uma variável experimental particular antes de o seleccionar para a experiência final. Ninguém quer descobrir durante as medidas finais, que uma parte da aparelhagem necessita de uma estabilidade em temperatura de, digamos, ±0,01 °C, quando utilizou sómente ±0,1 °C. Por outro lado não vamos querer gastar tempo e dinheiro a assegurar condições de funcionamento elaboradas que não são necessárias. A experiência bem projectada *faz o necessário e não mais do que o necessário*. Podemos sempre melhorar a experiência posteriormente, como o fez Millikan quando mediu a carga do electrão [Millikan, 1917].

5. Efectuar medidas preliminares

É sempre útil efectuar algumas medidas só para "sentir" o comportamento da aparelhagem. Será que é suficientemente sensível? Lê-se bem todos os mostradores? etc… Ninguém é tão habilidoso que consiga utilizar um aparelho com a mesma habilidade a primeira vez que o usa como quando já tiver alguma prática.

Deve-se recolher dados suficientes para se poder obter uma estimativa razoável do erro no valor final. Se este erro for demasiado grande será necessário re-projectar alguma coisa na experiência.

Em muitas experiências, uma das variáveis contribui de modo mais importante para o erro total do que todas as outras. As medidas preliminares devem permitir identificar essa variável. Pode-se, então, decidir como reduzir a sua contribuição para o erro: modificando os aparelhos usados para a medir ou aumentando o número de medidas.

6. Analisar os dados preliminares

Esta secção poderia estar incluída na anterior uma vez que faz pouco sentido realizar medidas preliminares se não as analisar. No entanto, uma parte da nossa estratégia incluirá o método de análise dos dados. É muito útil considerar neste momento se a nossa escolha original terá sido a melhor.

7. Reformular a experiência se for necessário

Depois dos passos 5 e 6 devemos estar em condições de decidir se os objectivos da experiência serão atingidos quando se fizerem as medidas definitivas. Se ainda houver qualquer dúvida deve-se considerar a possibilidade de alterar alguma coisa na experiência. Estas alterações podem envolver qualquer coisa desde a mudança simples de uma técnica até uma completa revisão de toda a experiência, ou mesmo o seu abandono. Se se tiver sorte, e um espírito bem alerta, podemos fazer uma descoberta inesperada como, por exemplo, a modificação da lei de Stoke para partículas pequenas descoberta por Millikan [Millikan, 1917] quando efectuava medidas da carga do electrão.

8. Efectuar a experiência "a sério"

Nos trabalhos de laboratório efectuados ao longo do curso, esta é a parte do projecto com que os alunos se encontram mais familiarizados, pois todas as anteriores já foram efectuadas pelo professor para assegurar que se podem obter resultados razoáveis no tempo limitado das aulas. É necessário lembrar-nos de comparar os nossos resultados com os obtidos por outras pessoas para que os erros sistemáticos, se os houver, sejam evidenciados. Estas comparações, quando feitas com cuidado, fornecem uma validação segura dos nossos resultados.

9. Escrever um relatório científico

Uma grande parte do sucesso do método científico reside na livre comunicação de experiências e resultados. Esta serve, não só para divulgar o conhecimento, mas também permite efectuar a validação de resultados inesperados ou novos. Sempre que algum cientista publica resultados completamente inesperados, estes só são completamente recebidos pela comunidade científica após a sua reprodução por outros laboratórios. Um caso recente desta metodologia que levantou muita polémica foi a "descoberta," em 1990, do fenómeno da fusão nuclear a "frio". A fusão de núcleos de hidrogénio, deutério e trítio liberta grandes quantidades de energia, que se pretende aproveitar para a produção de energia eléctrica, mas só ocorre em plasmas a temperaturas da ordem de 10^6 °C, o que exige equipamento gigantesco e sofisticado para se poder manter a reacção de modo contínuo. Pons e Fleishmann [Pons e Fleishmann, 199?] publicaram resultados que mostravam que essa reacção podia ocorrer à temperatura ambiente quando os gases se encontravam dissolvidos, em grande concentração, em certos metais tais como o paládio. A polémica em torno destes resultados durou vários anos pois muitos laboratórios tentaram, em vão, reproduzi-los enquanto outros os confirmavam. A dificuldade da validação destes resultados deveu-se ao facto de a sua confirmação implicar a detecção dos neutrões produzidos numa das reacções que se devia observar. Ora essa detecção é muito difícil e delicada e a maior parte dos laboratórios que o tentaram não estavam correctamente equipados ou os instrumentos não eram utilizados de forma correcta de modo a evitar os erros sistemáticos (numa notícia de um jornal português da época referiu-se um laboratório onde "os cientistas tiveram que fugir do laboratório devido ao súbito aumento da produção de neutrões na experiência").

2.4 Aproveitar bem o tempo nas experiências

Muitas vezes não temos todo o tempo necessário para conduzir a experiência como desejaríamos. É o que acontece aos estudantes nas aulas práticas em que realizam um trabalho completo, mas também os astrónomos se encontram nesta situação quando observam um fenómeno transitório como a passagem de um cometa, um eclipse ou a explosão de uma estrela "super-nova". Se se pretende tirar o maior partido destas experiências é necessário um plano de campanha bem elaborado.

Muitas vezes é possível fazer com que duas coisas decorram em simultâneo: o equipamento electrónico pode aquecer enquanto arranja outra parte do equipamento; um sistema automático de recolha de dados pode funcionar enquanto analisa os resultados anteriores, etc.

Mesmo que se tenha muito tempo para realizar a experiência é mais sensato aplicar mais esforço onde os dividendos sejam maiores, ou seja onde se diminua os erros sistemáticos ou aleatórios. Por outro lado qual será o interesse em fazer um esforço grande numa parte das experiência que tem pouca influência no resultado? Só se pode compreender bem uma experiência se pudermos apreciar igualmente os seus pontos fortes e fracos.

2.5 Exemplo — medir a densidade do papel

Consideremos que temos uma folha de papel A4, régua de 30 cm, micrómetro e balança. Seguindo os conselhos anteriores decidimos efectuar uma experiência preliminar.

Para termos uma medida grosseira dos erros aleatórios nas várias medidas vamos considerar uma incerteza de 1 no último algarismo de cada valor citado. É claro que podemos determinar um valor correcto para o erro, medindo repetidamente e calculando o desvio padrão da média, mas, por agora, só queremos só queremos um valor aproximado que nos permita calcular as contribuições relativas de cada variável para a densidade. Se as primeiras medidas derem os seguintes valores:

Comprimento:	c	$=$ 29,7 cm ± 0,1 cm
Largura:	l	$=$ 21,0 cm ± 0,1 cm
Espessura:	e	$=$ 0,011 cm ± 0,001 cm
massa:	m	$=$ 5,19 g ± 0,01 g

Logo Densidade:

$$r = m \,/\, cle$$
$$= 0{,}756\,483 \text{ g cm}^{-3}$$

Podemos pensar que mostrar seis algarismos significativos no valor da densidade não está muito correcto, e de facto não está, mas, como ainda não sabemos qual é o erro na densidade mais vale deixar alguns algarismos a mais do que ter que recalcular esse valor posteriormente caso sejam de menos. Para calcular o erro utilizamos a expressão da propagação de erros (ver Apêndice I), considerando que não há correlação entre as medidas:

$$\left(\frac{\sigma_\rho}{\rho}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_c}{c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_e}{e}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2$$

$$= \left(\frac{0.1}{29.7}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{21.0}\right)^2 + \left(\frac{0.001}{0.011}\right)^2 + \left(\frac{0.01}{5.19}\right)^2$$

$$= 1.13\times10^{-5} + 2.27\times10^{-5} + 8.26\times10^{-3} + 3.71\times10^{-6}$$

$$= 8.30\times10^{-3}$$

e portanto $\sigma_\rho = 0.069 \text{ g cm}^{-3}$

Ou seja $\sigma_\rho = 0.756 \pm 0.069 \text{ g cm}^{-3}$

Comentários

1. Obtivemos um erro menor que 10%. Se este erro for suficiente para o nosso objectivo não é preciso fazer mais nada e as medidas preliminares tornam-se definitivas (o que pode estar errado nesta decisão?).

2. Os valores da densidade da celulose citados no livro "*CRC Handbook of physics and chemistry*" (que é um livro de referência muito usado) encontram-se na gama 0,17—1,15 g cm^{-3}. As nossas medidas encontram-se dentro desta gama de valores.

3. A contribuição predominante para o erro na densidade provém da medida da espessura, *e*. Este é o ponto fraco da experiência e, se quisermos uma melhor medida para a densidade do papel, temos de melhorar a precisão deste valor. *Não se deve perder tempo a aumentar a precisão das outras três medidas*.

4. Se se quiser um erro menor que 10% pode-se aumentar a precisão da medida da espessura de várias maneiras:

i) utilizando um micrótomo com mais sensibilidade,

ii) pode-se obter uma ligeira melhoria interpolando entre os valores da escala do micrótomo, mas este procedimento exige uma consistência elevada na força com que se aperta o papel entre as garras do micrótomo. Repetir muitas vezes a medida não vai reduzir muito o erro, embora possa ser útil para verificar que a espessura é uniforme em toda a área,

iii) uma aproximação mais simples pode ser aumentar *e* sobrepondo vários bocados de papel. Vinte espessuras de papel são suficientes para reduzir o erro em *e* para um valor menor que em *c* ou *l*. que são os menos precisos a seguir à espessura. Se utilizarmos 20 espessuras, então, o novo ponto fraco passa a ser a medida do comprimento e largura da folha, e teríamos que considerar a redução destes erros para melhorar a nossa medida.

A aproximação ao problema delineada acima permite-nos melhorar a precisão da medida de modo eficiente, identificando o ponto fraco da experiência e concentrando os esforços na sua melhoria.

Embora possa ser difícil é, quase sempre, possível diminuir o erro. Mas, pode ser esforço inútil se houver erros sistemáticos maiores. Há várias aproximações à redução dos erros sistemáticos que serão abordadas no Capítulo 2.

2.6 Exemplo — Actividade de fontes radioactivas fracas

A actividade de uma fonte radioactiva não pode ser determinada só a partir de uma medida porque algumas das contagens observadas provém do fundo de radioactividade natural em vez da fonte em causa. É necessário efectuar duas medidas:

i) fonte + fundo, dando n_{s+b} contagens no intervalo de tempo t_{s+b};

ii) só o fundo, dando n_b contagens no intervalo de tempo t_b.

A actividade da fonte é determinada a partir da diferença entre estes dois valores.

Se dispusermos de um tempo fixo para fazer as duas medidas, como devemos dividi-lo entre cada uma delas? Vê-se facilmente que a divisão óptima do tempo vai depender da intensidade da fonte: se a fonte for muito forte quando comparada com o fundo não precisamos de grande informação sobre este pois a sua influência será pequena, ou seja passamos a maior parte do tempo a contar a fonte; no extremo oposto, se a fonte for muito fraca, a taxa de contagem nas duas medidas é aproximadamente igual sendo difícil distingui-las, ou seja deveríamos passar igual tempo a contar a fonte e o fundo. Procure-mos quantificar estas ideias qualitativas.

Vamos trabalhar utilizando as taxas de contagem (r, em contagens por segundo) que representam as intensidades da fonte e do fundo. Assim

	$r_{s+b} = n_{s+b} \,/\, t_{s+b}$	Fonte + fundo
e	$r_b = n_b \,/\, t_b$	Só fundo
logo	$r_s = n_s \,/\, t_s$	Só fonte

Naturalmente, como em qualquer experiência, que haverá erros aleatórios nas medidas de r_{s+b} e de r_b. Estes erros irão propagar-se dando um erro em r_s, a que vamos chamar σ_{r_s} .

Utilizando a regra para o erro numa diferença do Apêndice I:

$$\sigma_{r_s}^2 = \sigma_{r_{s+b}}^2 + \sigma_{r_b}^2 \tag{2-1}$$

mas, o decaimento radioactivo obedece à estatística de Poisson, em que o desvio padrão em n contagens é simplesmente $n^{1/2}$, assim, dividindo pelo valor correspondente de t para obter a taxa de contagens:

$$\sigma_{r_{s+b}} = \frac{\sqrt{n_{s+b}}}{t_{s+b}}$$

e

$$\sigma_{r_b} = \frac{\sqrt{n_b}}{t_b}$$

e portanto

$$\begin{aligned} \sigma_{r_s}^2 &= \frac{n_{s+b}}{t_{s+b}^2} + \frac{n_b}{t_b^2} \\ &= \frac{r_{s+b}}{t_{s+b}} + \frac{r_b}{t_b} \end{aligned} \tag{2-2}$$

O tempo total, T, utilizado para as duas medidas é a soma dos tempos individuais:

$$T = t_{s+b} + t_b \tag{2-3}$$

Eliminando t_b das equações (2-2) e (2-3) para calcular a fracção do tempo usado na medida da fonte radioactiva, dá

$$\sigma_{r_s}^2 = \frac{r_{s+b}}{t_{s+b}} + \frac{r_b}{(T - t_{s+b})} \tag{2-4}$$

A condição para se encontrar um mínimo em $\sigma_{r_s}^2$ é que a derivada em ordem ao tempo seja zero, ou seja

$$\frac{d\sigma_{r_s}^2}{\partial t_{s+b}} = 0$$

e portanto

$$-\frac{r_{s+b}}{t_{s+b}^2} - \frac{r_b}{(T - t_{s+b})^2} \times (-1) = 0$$

que após rearranjo dá

$$\frac{t_{s+b}}{T} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r_b}{r_{s+b}}\right)^{1/2}\right]} \tag{2-5}$$

Parece que devemos saber antecipadamente a *resposta* a (r_b/r_{s+b}) antes de poder decidir quais são as melhores condições para o fazer! Esta falta de lógica aparente pode ser evitada fazendo uma medida preliminar rápida, durante alguns minutos, para encontrar um valor aproximado de r_b/r_{s+b} antes de efectuar a medida final, por exemplo de algumas horas. Há três valores de r_b/r_{s+b} que merecem um comentário especial:

Tabela 1: Fracção de tempo de medida óptimo, em função da razão entre as taxas de contagem da fonte e do fundo.

r_{s+b}/r_b	t_{s+b}/T *óptimo*	*Comentários*
1	0,500	Fonte muito fraca
2	0,586	Fonte e fundo iguais
5	0,691	
10	0,760	
20	0,817	
50	0,876	
100	0,909	
200	0,934	
500	0,957	
1000	0,969	
5000	0,986	
Infinito	1	Fonte muito forte

Note-se que o primeiro e o último valores da tabela correspondem aos casos especiais que discutimos qualitativamente antes. É gratificante chegar aos valores que nos "parecem" correctos, embora não tivesse sido possível obter os valores intermédios sem a análise matemática.

Estes resultados são particularmente úteis, por exemplo, no teste da quantidade de radioactividade em alimentos, um assunto que teve particular importância na Europa após o acidente nuclear em Chernobyl.

Resumindo, há sempre uma maneira óptima de partilhar o tempo numa experiência. Esta baseia-se na necessidade de reduzir o erro no valor final ao mínimo com as restrições impostas pelo tempo e aparelhagem disponíveis. Pode ser necessário uma análise elaborada para obter as condições ideais, embora possamos ficar com uma ideia grosseira a partir do nosso conhecimento do que acontece em situações extremas.

3

Lógica Experimental

3.1 Um sistema experimental genérico

A maior parte das experiências têm três elementos entre os quais há um equilíbrio explícito ou implícito, representado pela equação:

$$\text{Entrada} + \text{Sistema} = \text{Resultados}$$

Geralmente temos informação acerca de dois destes elementos e procuramos fazer deduções sobre o terceiro. Consideremos os três exemplos da tabela seguinte, nos quais se mostra em tipo carregado a incógnita que se desloca da entrada para os resultados:

Tabela 2: Os elementos de três experiências

Experiência	*Entrada*	*Sistema*	*Resultados*
1	**Luz das estrelas**	Espectrómetro	Comprimentos de onda
2	Raios X	**Estrutura cristalina**	Ângulos
3	Lâmpadas de vapor	Espectrómetro	**Ângulos**

A experiência 1 utiliza a radiação proveniente de uma estrela como entrada de um telescópio ligado a um espectrómetro para medir os comprimentos de onda componentes dessa luz. Comparando estes comprimentos de onda com os produzidos por fontes semelhantes na Terra, pode calcular-se o desvio para o vermelho da luz emitida pela estrela, a partir da qual se pode deduzir a taxa de expansão do Universo.

Na experiência 2 medimos os ângulos segundo os quais os raios X são difractados por um cristal para determinar o arranjo dos átomos lá dentro.

Uma das mais famosas aplicações deste método foi a descoberta da estrutura da dupla hélice do DNA.

Na experiência 3 é efectuada a calibração de um espectrómetro medindo os ângulos segundo os quais radiação de comprimentos de onda fixos emergem do aparelho. Posteriormente pode utilizar-se o espectrómetro para medir o comprimento de onda de linhas espectrais desconhecidas a partir dos ângulos observados.

3.2 Erros sistemáticos

Erros sistemáticos é um simples eufemismo de erros experimentais. Estes erros são geralmente devidos a três causas:

i) instrumentos com pouca precisão,

ii) instrumentos diferentes das especificações esperadas,

iii) teoria incorrecta, ou seja, a existência de efeitos que não estão a ser tidos em conta.

O remédio para a primeira causa é—calibrar. Realizar a aferição dos instrumentos por comparação com padrões. Quanto às outras duas, não há nenhuma solução imediata. Quanto mais souber de física, mais experiência terá, maior probabilidade terá de identificar esses efeitos e ser capaz de os eliminar ou minimizar. Há, no entanto, certos procedimentos para a realização de medidas, e modos de realizar a sequência de medidas, que revelam automáticamente—e por vezes eliminam—certos tipos de erros. Neste capítulo vamos abordar esses métodos. Alguns são específicos, outros são mais gerais e traduzem mais uma atitude do que uma receita.

Encontrar e eliminar um erro sistemático pode parecer um objectivo desejável, mas, pode ser mais importante de que isso, porque um erro sistemático resolvido pode ser devido a um fenómeno desconhecido. É então promovido de 'erro' a 'efeito.' Por outras palavras, realizando medidas cuidadosas podemos fazer descobertas e aumentar o nosso conhecimento do mundo real.

3.3 Simetria aparente nos aparelhos

Uma regra muito útil é a seguinte; sempre que haja uma simetria aparente num aparelho, de tal modo que, invertendo alguma quantidade ou trocando dois componentes, não deva mostrar nenhum efeito (ou ter um efeito previsível—ver o terceiro exemplo—deve fazer essa mudança e realizar de novo a experiência. Vamos ilustrar esta regra com alguns exemplos.

(a) Suponha que está a fazer a comparação de duas resistências por meio de um potenciómetro (em que as duas resistências são montadas em série com uma bateria, e em seguida usa-se um outro circuito, com um potenciómetro linear e outra bateria, para equilibrar alternadamente a d.d.p. através de cada resistência, neste caso a razão entre as duas resistências é igual à razão entre os comprimentos lidos no potenciómetro) e não conhece nada acerca do efeito termoeléctrico. A simetria aparente do circuito é a direcção da corrente nos dois circuitos. Aparentemente o ponto de equilíbrio deve ser o mesmo se invertermos as duas correntes. Se o fizermos verificamos que não são. Esta troca revela-nos que há qualquer coisa com que não entrámos em conta. Investigando este fenómeno descobrimos que é devido a uma f.e.m. termoeléctrica que é independente da direcção das duas correntes. Neste caso, eliminamos este erro sistemático, fazendo simplesmente a média dos dois pontos de equilíbrio.

(b) Considere uma experiência para medir a conductividade térmica de um material, em que é necessário medir a diferença de temperatura, $\Delta\theta$, entre dois pontos P e Q. Suponha que o faz utilizando um par de termómetros idênticos colocados em P e Q. Por simetria trocar os dois termómetros não deve ter qualquer efeito no resultado. Fazemos a troca e verificamos que há uma diferença, o que indica que os termómetros não estão a indicar a temperatura correcta. Se o valor de $\Delta\theta$ é pequeno, o seu valor determinado só por um par de temperaturas pode estar muito errado. Trocando os termómetros e fazendo a média entre as duas medidas de $\Delta\theta$ reduz consideravelmente o erro. (Se $\Delta\theta$ é pequeno, um método melhor é medi-lo directamente, suprimindo o procedimento desagradável de fazer a diferença entre duas quantidades quase iguais. Isto pode ser feito colocando termómetros de resistência de platina em P e Q e ligando-os em braços opostos de uma ponte de Wheatstone, ou colocando duas junções de termopar, ligadas em série, nesses pontos.)

(c) O terceiro exemplo é a ponte de Wheatstone. Na Figura 1 R é uma

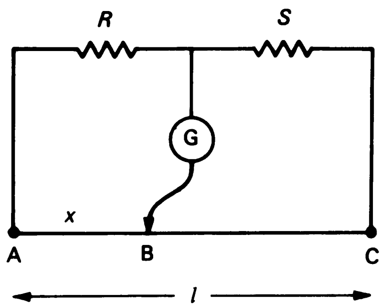


Fig. 1 - Ponte de Wheatstone

resistência desconhecida e S é uma resistência calibrada conhecida. O valor de R é determinado encontrando o ponto de equilíbrio B no potenciómetro AC. Designando a distância AB por x_1 e o valor AC por l, temos

$$\frac{R}{S} = \frac{x_1}{l - x_1} \tag{3-1}$$

Por simetria se trocarmos R e S, o novo valor de AB deve ser

$$x_2 = l - x_1 \tag{3-2}$$

Fazendo a mudança obtemos um valor diferente. Esta operação revelou a existência de efeitos de assimetria no potenciómetro. neste caso a substituição de x_1 na equação 3-1 pela média de x_1 e de $l - x_2$ não elimina o erro.

3.4 Sequências de medidas

A *ordem* por que são feitas as medidas pode ser muito importante, como se ilustra no seguinte exemplo. Pede-se a três estudantes para determinar como varia a velocidade terminal de uma esfera que cai num líquido em função do seu diâmetro. Dá-se-lhes um conjunto de 4 bolas metálicas de vários tamanhos e um tanque grande de glicerina.

O estudante X pega na bola maior e mede a sua velocidade terminal cinco vezes, em seguida pega na segunda maior e faz o mesmo, continuando este procedimento até chegar à mais pequena. Os seus resultados são fracos. Porquê? Porque o laboratório aqueceu durante o tempo em que a experiência foi realizada, aquecendo também a glicerina. A viscosidade da glicerina, como a de qualquer fluido, diminui drásticamente com o aumento da temperatura. Como a velocidade terminal depende não só do diâmetro da bola mas também da viscosidade do fluido, uma vez que a viscosidade média era diferente para cada bola os resultados não dependem só da variação do diâmetro da bola.

O estudante Y, que sabe mais Física que o seu colega, sabe que a velocidade terminal também depende da viscosidade do líquido, e portanto da temperatura, e constrói um dispositivo para manter constante a temperatura da glicerina. Realiza as medidas na mesma sequência que o estudante X obtendo um resultado muito melhor mas ainda incorrecto. Porquê? porque Y não sabe que o relógio que utiliza para realizar as medidas atrasa-se gradualmente, o que dá um efeito sistematicamente diferente para cada uma das 4 bolas.

O terceiro estudante Z é tão ignorante como o estudante X acerca do efeito da temperatura nas medidas e o seu relógio atrasa-se tal como o de Y, mas obtém os melhores resultados. Isto é devido à seqência em que ele—instintivamente—fez as medidas.

Designem-se as 4 bolas por A, B, C e D. Suponha que, em vez de cinco medidas sucessivas para a bola A, seguida de 5 medidas para B, etc. as medidas são feitas pela seguinte ordem

ABCDABCD...

Agora em vez da bola A ser medida com a viscosidade alta e D com a viscosidade baixa, está-se a medir todas as bolas com um valor elevado e depois com um valor mais baixo, e assim sucessivamente. Apesar disso, embora esta sequência reduza o erro sistemático consideràvelmente, ainda se verifica que dentro de cada 4 medidas A vem na viscosidade alta e D na baixa. Por isso uma sequência ainda melhor será

ABCDDCBA, (3-3)

que é repetida tantas vezes quanto seja possível. É deste modo que o estudante Z fez as suas medidas. (Uma precaução extra seria fazer a segunda sequência BCDAADCB e assim por diante.) Pode-se ver que, ao longo da sequência inteira de medidas os efeitos de uma variação suave com o tempo, quer da viscosidade quer da precisão do relógio, quer mesmo de qualquer outro factor que não seja o diâmetro das bolas, será provavelmente muito pequena.

É de notar que mesmo o método de Z pode ser melhorado. A sua ignorância do efeito de temperatura é muito pouco meritória. As medidas nesta experiência são tão sensíveis à temperatura do líquido, que um experimentador competente não só adoptaria a sequência de Z, mas também mediria a temperatura de vez em quando para verificar se haveria alguma correlação acidental entre esta e a sequência dos diâmetros das bolas

3.5 Variações intencionais e acidentais

Numa experiência realizada para medir o efeito da variação de uma quantidade, tentamos, obviamente, manter constantes todas as outras quantidades. Há, no entanto, sempre a possibilidade de variações destas últimas e como vimos na secção anterior há métodos para reduzir os efeitos dessas variações. O método indicado é muito eficaz, mas só é aplicável quando as variações indesejáveis não são causadas, nem estão relacionadas com a quantidade que estamos a variar. No exemplo anterior este pressuposto é claramente observado. Nem a temperatura da glicerina, nem a precisão do relógio dependem de forma nenhuma do diâmetro da bola que decidimos lançar em seguida.

Considere, no entanto, a seguinte experiência. Pretendemos investigar o fenómeno de magnetoestrição, ou seja, a variação das dimensões de um material ferromagnético provocado pela aplicação de um campo magnético. Coloca-se um varão de ferro num selenóide e mede-se o seu comprimento em função da corrente (proporcional ao campo magnético) que passa pelo selenóide.

Uma vez que a variação no comprimento devido à magnetoestrição é muito pequeno—a fracção da variação para a magnetização completa é da ordem de 5×10^{-5}—para efectuar as medidas com precisão, é preciso manter constante a temperatura da amostra, senão a expansão térmica obscurece completamente o efeito magnético por ser muito maior. Ao aumentar a corrente no selenóide aumentamos o calor aí libertado o que pode dar origem a um aumento de temperatura na amostra. O método referido na última secção não é relevante aqui—a quantidade que estamos a variar é que está a *causar* a variação indesejada. O que pretendemos é assegurar que a corrente através do selenóide *não* afecte a temperatura da amostra, usando, por exemplo, um selenóide arrefecido por água.

3.6 Variações temporais (drift)

Na página 30 vimos um exemplo duma variação sistemática lenta, ou *drift*, durante uma experiência. Para além da temperatura outras grandezas comuns que podem variar com o tempo são a pressão atmosférica e humidade, a f.e.m. de um acumulador, a voltagem da rede e mesmo a sua frequência. Uma das maneiras de reduzir os efeitos causados por estas variações é escolher uma sequência de medidas que seja apropriada, mas muitas vezes o que pretendemos em primeiro lugar é suprimir, ou minimizar, essas variações. Isso é, em geral, feito recorrendo a dispositivos servo assistidos ou de realimentação negativa.

No exemplo da página 30 também vimos um exemplo de variação *instrumental*. Devemos ter sempre presente que os instrumentos podem ter variações—os seus zeros podem variar, bem como as suas sensibilidades. Pode por isso ser necessário calibrar um instrumento mais do que uma vez durante uma experiência.

É de notar que a própria operação de calibração pode fazer parte de uma sequência de operações que pode dar origem a um erro sistemático. Suponha que se estão a comparar duas voltagens V_1 e V_2 por meio de um potenciómetro. A f.e.m. da pilha associada ao potenciómetro tem tendência para diminuir com o tempo. Assim se, depois de se calibrar o instrumento, medirmos sempre V_1 primeiro e depois V_2, o valor obtido para V_1/V_2 irá ser sistematicamente mais baixo que o real.

3.7 Variações sistemáticas

Observemos os números da Tabela 3 que representam medidas do diâmetro d de um pedaço de fio ao longo do seu comprimento x. Se lhe pedissem qual era o melhor valor para o diâmetro e para estimar qual seria o erro padrão duma só medida, como procederia? (Pare e decida antes de continuar.)

Tabela 3: Valores da medida do diâmetro de um fio em vários pontos ao longo do seu comprimento.

Comprimento (m)	*Diâmetro (mm)*
0.0	1.259
0.0	1.263
0.0	1.259
0.0	1.261
0.0	1.258
0.1	1.252
0.2	1.234
0.3	1.209
0.4	1.214
0.5	1.225
0.6	1.248
0.7	1.258
0.8	1.256
0.9	1.233

Vejamos como os nossos amigos X e Y atacariam o problema. X não tem dúvidas. Disseram-lhe que o melhor valor de uma quantidade é a média de várias medidas e deram-lhe uma expressão para encontrar o erro padrão. Como ele fica muito contente por seguir as regras, determina a média de todos os valores, que é 1.245 mm, e calcula σ a partir da expressão conhecida, o que dá 0.020 mm.

Y nota que os valores medidos não variam de uma maneira aleatória e decide fazer um gráfico com eles como se mostra na Figura 2. Como se pode ver é óbvio que a variação é sistemática. Ele chega à conclusão que a média de todas as medidas não tem qualquer significado. O diâmetro foi medido cinco vezes na posição x=0, por isso o seu valor é dominante. Assim substitui estes cinco valores pela sua média, que é 1.260 mm. Em seguida determina a média dos dez valores com que fica obtendo 1.239 mm como o seu melhor valor.

Além disso ele verifica que, uma vez que o diâmetro varia significativamente ao longo do comprimento, a dispersão dos valores ao longo da distância x medida não tem nada a ver com o erro padrão de uma só medida. Para obter a sua estimativa de erro padrão calcula-a (com a mesma expressão que X) mas para os cinco valores para x=0, obtendo 0.002 mm. (Sem

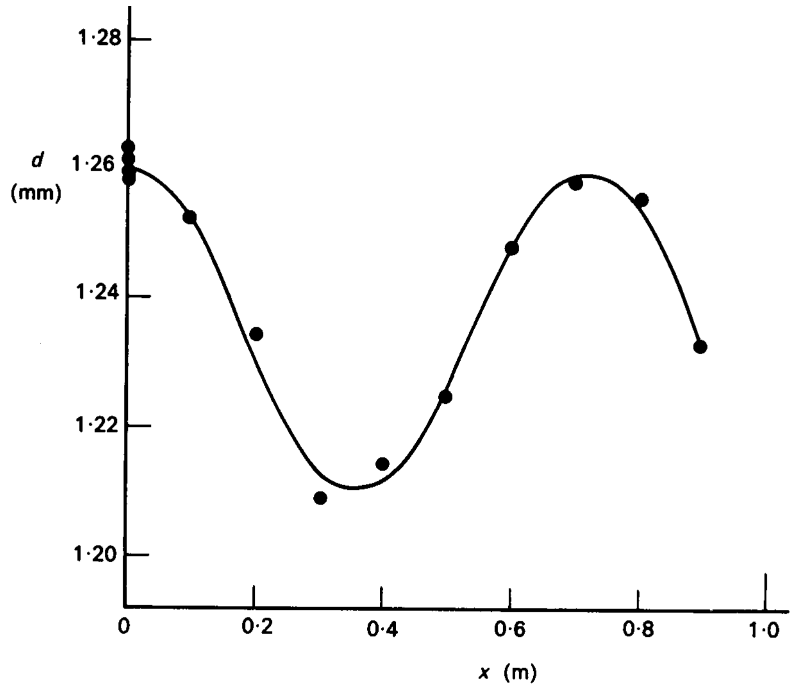


Fig. 2 - Diâmetro, *d*, de um fio em vários pontos ao longo do seu comprimento *x*—gráfico dos valores da Tabela 3.

mais informação acerca das medidas não é possível dizer se este é um erro aleatório ou se a secção do fio para x=0 não é circular.)

A aproximação utilizada por Y é razoável, mas há que fazer uma nota relativamente ao 'melhor' valor de d. Uma vez que d varia de um modo sistemático o valor de que necessitamos não é necessariamente d_m, a média obtida por Y. Se, por exemplo, se tiver medido a resistência do fio e pretendermos determinar a resistividade do material, a quantidade necessária é o valor médio de $1/d^2$, que não é bem igual a $1/d_m^2$. Neste caso a diferença é pequena, mas noutros pode não ser, e deve-se calcular a média correctamente.

Outra situação que requer atenção é um conjunto de resultados que variam mais do que o indicado pelos erros. Considere o conjunto de valores da velocidade do som no ar, à temperatura ambiente, dados pela Tabela 4. Podemos supor que foram obtidos medindo o comprimento de ondas estacionárias de diferentes frequências num tubo de ressonância.

Tabela 4: Valores medidos da velocidade do som no ar.

Frequência (Hz)	*Velocidade (m s^{-1})*
1000	346.7
720	341.5
200	338.6
600	342.2
380	339.6

Suponhamos que, para cada frequência fizeram-se muitas medidas de tal modo que o erro padrão em cada resultado individual era

$$\sigma = 0.7\text{ms}^{-1} \tag{3-4}$$

Nesta situação alguns estudantes calculam simplesmente a média dos cinco resultados e calculam o erro como

$$\sigma_m = \frac{0.7}{\sqrt{5}} \approx 0.3\text{ms}^{-1} \tag{3-5}$$

ignorando pura e simplesmente o facto de que três dos resultados têm desvios relativamente ao valor médio de 3σ, 4σ e 7σ. Se o valor de σ dado na equação 3-4 estiver razoavelmente correcto, estes valores são uma clara indicação de que estamos na presença de algum efeito sistemático e, até esse efeito ser descoberto, não se podem considerar muito significativos nem os valores da média nem o de σ_m.

Com movimentos ondulatórios há sempre a possibilidade da velocidade variar com a frequência, a este fenómeno chama-se *dispersão*. Medidas cuidadosas de muitos experimentadores mostraram que, para ondas de som no ar, não há nenhuma dispersão mensurável para as frequências da Tabela 4. Há, no entanto, pequenas correcções a fazer em todas as experiências com tubos de ressonância, e estas correcções dependem, em geral, da frequência (ver Wood 1940, capítulo X). É perfeitamente possível que um erro sistemático nestas correcções tenha causado as variações observadas.

Vamos então fazer um gráfico das velocidades em função da frequência—Figura 3. Com efeito parece de facto haver uma correlação, e, se as medidas forem fáceis de fazer, valia a pena efectuar mais algumas para outras frequências para ver se a correlação se mantém. Se isso se verificasse, deveríamos considerar cuidadosamente a correcção que é função da frequência para ver de que modo poderia surgir aquela correlação. Caso contrário teríamos que procurar a causa noutro sítio. Este exemplo mostra um dos modos de proceder numa situação que é vulgar acontecer.

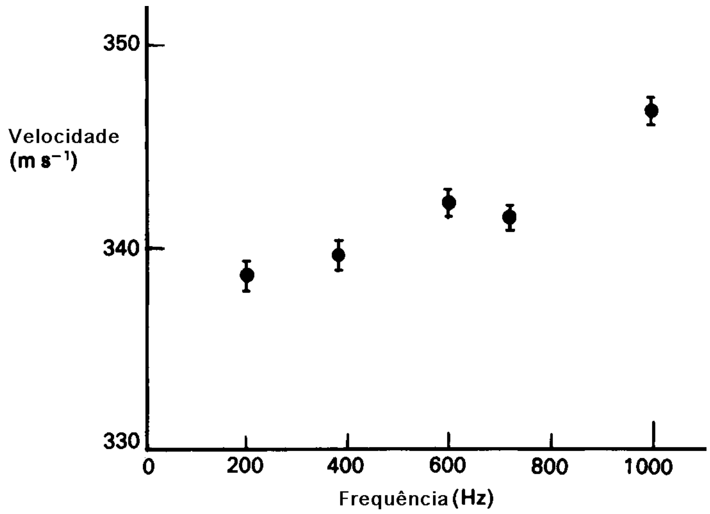


Fig. 3 - Valores da velocidade do som para diferentes frequências—gráfico dos valores da Tabela 4.

3.8 Correcções calculadas e empíricas

Têm que se efectuar correções em muitas experiências para ter em conta efeitos sistemáticos. Ao fazer a estimativa da grandeza destas correcções deve-se dar sempre preferência a métodos empíricos, ou seja, métodos baseados em medidas reais, em vez de usar cálculos teóricos. Estes últimos podem estar errados por uma série de razões—usar a teoria errada, pressupostos incorrectos, cálculos errados—enquanto que os métodos empíricos são, pela sua própria natureza menos sujeitos a erros.

Suponha, por exemplo, que está a investigar a transmissão de luz para um determinado comprimento de onda através de um certo líquido. Colocamos o líquido numa célula de vidro, com as suas paredes perpendiculares ao feixe de luz, (Figura 4) e medimos a intensidade da luz, I_X e I_Y nos pontos X e Y respectivamente. Vamos supor, para simplificar, que se determinou que o factor de transmissão

$$f = \frac{I_x}{I_y} \tag{3-6}$$

é independente de I_X. Necessitamos dos valores de f para a espessura de líquido sómente, e uma vez que a célula não é completamente transparente, é necessário corrigir as medidas devido à atenuação da luz nas duas paredes da célula.

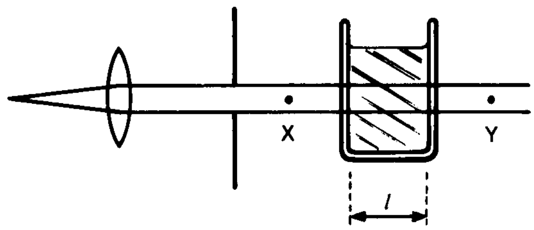


Fig. 4 - Dispositivo para a medição da atenuação de um feixe de luz por uma amostra líquida.

A maneira de fazer esta correcção teóricamente seria, medir a espessura das paredes e procurar numa tabela a atenuação produzida, para esta espessura, por este particular tipo de vidro e para o comprimento de onda utilizado. Considerando que essa informação existe, a correcção dependerá fortemente no nosso conhecimento correcto da espessura da parede—pode não ser constante e teríamos que obter a média correcta sómente na área que é atravessada pela luz. Também dependerá do nosso conhecimento exacto do comprimento de onda da luz, e, sobretudo, dependerá da certeza de que o tipo de vidro da célula é exactamente o que está tabelado.

O método empírico consiste em medir primeiro as intensidades em X e Y com a célula vazia, e, sem mexer na célula de modo a manter a mesma posição relativamente ao feixe de luz, enchê-la com líquido e repetir as medidas. Podemos ver que este procedimento elimina todas as dificuldades mencionadas no último parágrafo.

Embora as correcções empíricas sejam preferíveis às teóricas, o melhor método é obter a mesma correcção das duas maneiras verificando que estão de acordo. Este acordo não só confirma a validade das correcções efectuadas mas também aumenta a nossa confiança nas medidas pois assegura-nos que temos uma compreensão correcta dos fenómenos físicos envolvidos. Por exemplo na experiência anterior, se as correcções teóricas e experimentais coincidissem teríamos a certeza que qualidade do vidro estava de acordo com as suas especificações e também que as suas paredes eram bastante uniformes. Assim, para realizar um grande número de medidas de rotina poderíamos efectuá-las corrigindo-as com o nosso valor teórico e fazendo sómente a correcção empírica ocasionalmente para garantir que não havia outros factores a alterar as medidas (por exemplo drift dos instrumentos).

3.9 Métodos relativos

Como referimos na página 28 o método do potenciómetro permite medir a razão entre duas resistências eléctricas (R_1/R_2). Este é um exemplo de um *método relativo*. A grandeza R_1 é medida, não de modo absoluto, mas em termos de, ou relativamente a, R_2. Os métodos relativos são muito importantes em Física. Podem ser mais precisos e fáceis de executar do que medidas absolutas, e frequentemente é tudo o que precisamos.

Consideremos como exemplo a medida da viscosidade de um líquido por um método baseado na expressão de Poiseuille para o fluxo de um líquido através de um tubo capilar. A expressão é a seguinte

$$\frac{dV}{dt} = \frac{p\pi r^4}{8l\eta}, \tag{3-7}$$

em que dV/dt é a taxa de fluxo volúmico do líquido, p é a diferença de pressão ao longo do comprimento l do capilar, r é o diâmetro interno do capilar e η é a viscosidade do líquido. Se mantivermos, e medirmos, uma diferença de pressão constante ao longo do tubo, e medirmos dV/dt, l e r podemos calcular a viscosidade. Esta é uma medida absoluta.

Consideremos agora o aparelho representado na Figura 5, trata-se de

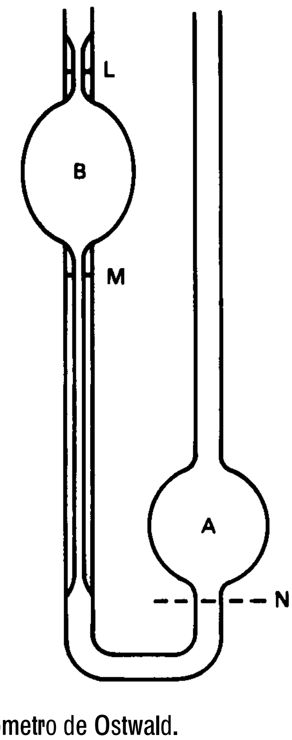


Fig. 5 - Viscómetro de Ostwald.

um viscómetro desenhado por Ostwald. Um volume fixo de líquido de densidade ρ_1 e viscosidade η_1 é introduzido em A e aspirado par o volume B de maneira que o seu nível mais alto esteja ligeiramente acima de L, à esquerda, e N à direita. Regista-se o tempo, τ_1,que o líquido demora a cair de L para M—ambos os níveis devem estar marcados com precisão. Substitui-se o líquido por um outro com densidade ρ_2 e viscosidade η_2, e mede-se o respectivo tempo τ_2. Pode mostrar-se fácilmente que a razão entre as viscosidades dos dois líquidos é dada por*

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\rho_1\tau_1}{\rho_2\tau_2} \tag{3-8}$$

A medida das grandezas do lado direito da equação 3-8 é relativamente simples.

É de notar que este método relativo evita completamente duas dificuldades do método absoluto. A primeira é criar e medir uma pressão constante, e a segunda é a medida do raio interno do capilar, o que deve ser feito com precisão elevada, pois este entra na expressão elevado à quarta potência. Por outro lado a simplicidade do aparelho de Ostwald facilita o controle de temperatura. Como já foi mencionado, a temperatura tem um grande efeito na viscosidade, portanto a facilidade em a manter constante é uma vantagem muito importante.

Outro exemplo de medidas relativas é a determinação de g, a aceleração devida à gravidade. Medir g com grande precisão é muito difícil, o aparelho tradicionalmente utilizado para essas determinações é um pêndulo reversível†, mas este método está sujeito a um grande número de fontes de erro, e, embora com cuidado, se possam tornar quase desprezáveis, condições de irregularidade no cutelo impõem um limite máximo à precisão que se pode obter. Medir a *razão* entre os valores de g em dois sítios diferentes é muito mais fácil. Baste determinar o período de um pêndulo—não é preciso ser reversível—no mesmo suporte em ambos os sítios. Se os valores de g forem g_1 e g_2, e os valores dos períodos forem T_1 e T_2, então

$$\frac{g_1}{g_2} = \frac{T_2^2}{T_1^2}\,. \tag{3-9}$$

Muitos dos erros, incluindo os do cutelo, são eliminados; o erro principal a eliminar passa a ser o devido a variações no comprimento do pêndulo. Graças a este tipo de medidas é vulgar obter valores relativos de g com

* A equação 3-8, tal como a relação de Poiseuille, na qual se baseia, ignora o facto do líquido adquirir energia cinética. É necessária uma pequena correcção para tomar em conta este facto—ver Smith 1960, capítulo XI para mais pormenores.

† O método de determinação do valor absoluto de g mais preciso é, actualmente, a determinação do tempo de queda de um corpo em queda livre—ver o problema 4

uma imprecisão de 1 parte em 10^7 ou 10^8, no entanto só recentemente se determinou o valor absoluto de g com este grau de precisão.

Na maioria dos casos não é necessário o valor absoluto de g, mas sim um valor relativo. Os factores mais importantes na variação de g são a latitude e a altitude.Quando se entra em conta com estes factores a variação que resta, quando é relativa a grandes distâncias pode dar informação acerca da estrutura dos continentes e oceanos; variações em pequenas distâncias dão informação acerca da estrutura geológica local.

Outros exemplos de medidas relativas são quantidades como a intensidade de uma fonte radioactiva, a intensidade de uma fonte de luz, ou o fluxo de radiação de uma galáxia distante. Em qualquer destes casos a determinação absoluta da grandeza é muito difícil e efectuam-se as medidas relativamente a outra quantidade semelhante.

Finalmente não nos esqueçamos que, se soubermos o valor absoluto de uma grandeza para *um* caso, todos os valores relativos podem ser convertidos em valores absolutos. Deste modo, se colocarmos um líquido de viscosidade e densidade conhecidas num viscómetro de Ostwald, qualquer medida para outro líquido dá a sua viscosidade absoluta.* Do mesmo modo uma vez determinado o valor de g de modo absoluto num ponto, a rede de valores relativos torna-se uma rede de valores absolutos.

3.10 Porquê medidas de elevada precisão?

A precisão que se deve procurar obter numa determinada experiência depende, em geral, no objectivo dessa mesma experiência. Uma determinação com pouca precisão pode ser mais importante porque pode ser obtida mais rápidamente ou mais económicamente. É a utilização dos resultados que quase sempre determina a precisão exigida nas medidas. Não tem sentido medir a área de um terreno com uma precisão da milésima do metro quadrado para fazer um escritura de compra e venda. No entanto, em muitas experiências de física, e em particular quando se medem quantidades fundamentais, não sabemos qual é a precisão que, finalmente, pode ser necessária. Por exemplo, o valor de π=3.141, é perfeitamente suficiente para quase todos os cálculos realizados na Terra, incluindo a balística de longo alcance. Mas para o lançamento de satélites e outras explorações espaciais para fora da influência da Terra já é necessário usar um valor com pelo menos 4 ou 5 casas decimais. Quando se medem grandezas fundamentais tentamos sempre obter a maior precisão possível com as técnicas disponíveis. Porquê?

---

* O efeito da energia cinética mencionado na nota da página 39 requer que se utilizem *dois* líquidos de viscosidade conhecidas. Mas, como já deve ter pensado, o procedimento mais satisfactório será calibrar o aparelho com *vários* líquidos de viscosidade conhecida.

Se ler um artigo de 1965 por Cohen e DuMond intitulado "Our Knowledge of the Fundamental Constants of Physics and Chemistry"*—o que é fortemente recomendado pois contém uma discussão fascinante e comentários sobre o método experimental—encontrará resumos das medidas mais precisas (à época) destas constantes. Verificará que algumas dessas constantes são conhecidas a menos de uma parte num milhão ou melhor. É claro que se pode interrogar se haverá alguma razão de ser destas medidas, ou se estas são um exercício fútil como a determinação de centenas de decimais do valor de π. A resposta é muito simples. Experiências com elevada precisão têm um fim importantíssimo que é testar as nossas ideias teóricas e, quando dão resultados que não concordam com a teoria, conduzem à formulação de novas teorias e descobertas. Uma teoria diz que duas grandezas são iguais. Fazemos uma experiência e confirmamos, dentro dos limites de erro da experiência, que são iguais. Fazemos uma experiência mais precisa e encontramos uma pequena diferença. Por outras palavras, a teoria é só uma primeira aproximação. A experiência mais precisa vai guiar-nos no próximo passo teórico. Vejamos alguns exemplos de descobertas que foram feitas graças à realização de medidas cuidadosas e de grande precisão.

(a) Antes de 1894 pensava-se que, aparte pequenas quantidades variáveis de vapor de água e de traços de dióxido de carbono, hidrogénio, etc., o ar era composto por oxigénio e azoto. No entanto, Rayleigh, ao efectuar medidas muito cuidadosas da densidade do gás que ficava após a remoção do oxigénio, era cerca de meio por cento mais alta do que a densidade do azoto puro obtido a partir de um composto químico como a amónia. Esta observação levou Rayleigh e Ramsay (1895) à descoberta do gás inerte, árgon, que se sabe agora constituir cerca de 1 por cento da atmosfera.

(b) A descoberta do deutério é outro exemplo da utilidade de medidas exactas. Em 1929 mediu-se a razão entre a massa do átomo de hidrogénio e do átomo de ^{16}O (o isótopo do oxigénio com massa 16) por determinação química de pesos atómicos obtendo-se

$$\frac{\text{massa de H}}{\text{massa de } ^{16}\text{O}} = \frac{1.00799 \pm 0.00002}{16}.$$

Em 1927 Aston tinha medido a mesma razão num espectrómetro de massa e obtido

$$\frac{\text{massa de H}}{\text{massa de } ^{16}\text{O}} = \frac{1.00778 \pm 0.00005}{16}.$$

* Cohen e DuMond 1965.

Esta discrepância entre os dois valores levou Birge e Menzel (1931) a sugerir que o que se estava a medir no caso da determinação química seria a massa *média* dos átomos do hidrogénio gasoso normal, e se este contivesse um isótopo pesado de massa 2, na proporção de 1 parte em 5000, a discrepância estaria justificada. (No espectrómetro de massa só contribui para a medida o isótopo leve do hidrogénio.) Esta sugestão foi confirmada pouco depois por Urey, Brickwedde e Murphy (1932), que encontraram linhas muito fracas no espectro do hidrogénio. O comprimento de onda destas linhas concordava exactamente com os valores calculados para a série de Balmer do hidrogénio com número de massa 2.

(c) Michelson e Morley após experiências realizadas entre 1881 e 1887, sugeriram que a velocidade da luz no vazio é constante para todos os observadores em movimento relativo uniforme. Na sua aparelhagem obtinha franjas de interferência entre feixes de luz que se propagavam em duas direcções perpendiculares, não encontrando diferenças significativas para a velocidade nas duas direcções qualquer que fosse a altura do dia ou do ano em que as medidas fossem feitas. Estas medidas e outras semelhantes levaram Einstein a formular a teoria da relatividade restrita, uma das grandes descobertas da física. Mesmo a teoria pré-relativista previa uma diferença pequena para as duas velocidades, sendo, portanto, necessário medidas com elevada precisão para tornar evidente que essa diferença, se existisse, era muito menor que o valor esperado. (Para uma descrição detalhada da experiência de Michelson—Morley, incluindo valores numéricos, ver Rosser 1964.)

As medidas originais da velocidade da luz foram feitas com ondas no visível com cerca de 500 nm. Quando se fizeram medidas durante e depois da segunda guerra mundial, com micro-ondas—com comprimentos de onda da ordem de 10mm—verificou-se que o valor da velocidade obtido era cerca de 17 km s^{-1} maior que o valor óptico, apesar do erro nas duas medidas ser da ordem de 1 km s^{-1}. A diferença é somente uma parte em 20 000; no entanto, se esta discrepância fosse real as consequências para as nossas teorias actuais de electromagnetismo seriam bem graves.

Uma vez mais, medidas cuidadosas e precisas foram necessárias para resolver esta questão. Uma repetição das medidas ópticas não confirmou os resultados anteriores mas estava de acordo com as medidas com micro-ondas. Dois valores representativos são

Bergstrand	óptica	$299\,792.85 \pm 0.16$ kms^{-1},
Froome	Micro-ondas	$299\,792.50 \pm 0.16$ kms^{-1}.

Exercícios

Estude cuidadosamente as seguintes experiências:

1 - Um teste, com elevada precisão, da Lei de Coulomb para a força entre cargas. (Plimpton e Lawton 1936.)

2 - A medida de e/m para electrões. (Dunnington 1937.)

3 - Medida da velocidade da luz. (Froome 1954 e 1958.)

4 - Uma nova determinação absoluta da aceleração da gravidade. (Cook 1967a e b.)

5 - A equivalência entre massa inercial e massa gravítica. (Roll, Krotkov e Dicke 1964; ver também Dicke 1961.)

6 - O peso aparente dos fotões. (Pound e Rebka 1960.)

7 - A determinação da razão giromagnética do protão. (Vigoureux 1962.)

4

Bom Senso Experimental

No presente capítulo vamos abordar algumas regras de bom senso quando se realiza um experiência. Estas aplicam-se a todas as experiências, desde a mais elementar até à mais elaborada.

4.1 Experiências preliminares

Numa experiência real, ao contrário dos exercícios, é costume fazer-se sempre um ensaio preliminar. Este ensaio tem diversos objectivos.

(a) O experimentalista 'aprende' como fazer a experiência. Qualquer experiência tem as suas técnicas e procedimentos próprios, e é necessário que o investigador treine esses procedimentos. Em geral as primeiras medidas de uma experiência não são tão fiáveis, ou úteis, como as posteriores, e é, quase sempre, mais económico em tempo dedicar um período inicial para estabelecer o melhor método de realização das medidas e de registo dos resultados.

(b) Verificar as várias partes do equipamento para se garantir que estão a funcionar correctamente.

(c) Determinar a gama de medidas de cada variável.

(d) Deve-se estimar os erros nas diversas quantidades. Como já se viu, este conhecimento influencia a estratégia a adoptar para a realização da experiência, no sentido de prestar mais atenção às quantidades cujos erros contribuam mais para o erro final.

Os pontos (c) e (d) dizem-nos simplesmente que qualquer experiência deve ser planeada, e que algumas medidas de teste fornecem uma base de trabalho melhor do que muita teoria. Naturalmente o plano de trabalho deve ser flexível e deve poder ser modificado à medida que se realiza a experiência. Mesmo o plano de trabalho mais rudimentar é preferível a fazer medida após medida como nos for ocorrendo.

Quando se realizam experiências de disciplinas laboratoriais o âmbito da experiência preliminar é um pouco limitado, pois esta já está idealizada e planeada, e, muitas vezes, nem sequer dispõe de tempo para realizar a experiência toda 'à primeira'. No entanto, excepto nas experiências mais simples, deve-se sempre realizar *algumas* medidas preliminares e elaborar um plano de trabalho. Este inclui a decisão acerca de que quantidades vão ser medidas e quanto tempo se vai dedicar a cada uma delas.

Uma outra questão importante diz respeito ao equipamento. Certifique-se que conhece o modo de operar dos aparelhos que vai utilizar no sentido de saber o que controla o quê, antes de começar quaisquer medidas sistemáticas. Se se deparar, por exemplo, com um espectrómetro, certifique-se, *antes* de fazer qualquer medida, que sabe como se roda a mesa do prisma, como se roda o telescópio, que parafuso deve ser apertado para tornar efectivo um ajuste micrométrico, que escala micrométrica corresponde a que movimento, etc. Se dispuser de um manual do aparelho ou de um guia de trabalho, *leia-o* primeiro.

Pode-se pensar que tudo isto é muito óbvio, e de facto é-o. No entanto, é surpreendente a quantidade de pessoas que não têm este senso comum básico quando se trata de trabalho experimental. Maneiras sofisticadas de tratamento de resultados e evitar erros subtis, estão muito bem, mas não são substituto para o senso comum.

4.2 Verificar o óbvio

Se o aparelho deve estar mecânicamente bem apoiado, e a maioria deve, verifique que não abana. Lembre-se que três pontos definem um plano (desde que não estejam em linha recta). Por isso três é o número ideal de pernas para um aparelho, e, quanto mais próximo estiverem de um triângulo equilátero melhor. Com mais de três pontos de apoio o aparelho pode abanar quando se colocar num plano, a menos que se tenha tido o cuidado de colocar os pontos de contacto no mesmo plano. Se é suposto o aparelho ficar nivelado *verifique* que está aproximadamente nivelado. Pode sempre usar um nível para o fazer.

Em experiências de óptica, certifique-se que todas as superfícies reflectoras e refractoras se encontram limpas. Uma bafejadela e limpeza rápida com um pano podem fazer maravilhas com aparelhos baratos. Mas *não* limpe lentes caras com um lenço ou pano vulgar. Estas lentes são feitas de vidros macios e, além disso, são muitas vezes cobertas por uma camada muito fina—cerca de 100 nm de espessura—de um sal mineral para diminuir as reflexões nas superfícies. Estas lentes riscam-se com muita facilidade. Nunca se deve tocar-lhes com os dedos e devem ser tapadas quando não estão a ser utilizadas. Podem ser limpas com um pincel de pêlo de camelo ou, em casos mais extremos, com um tecido especial para lentes.

Verificar que os componentes ópticos, que se supõe devem estar alinhados, o parecem estar, e que os planos das lentes se encontram colocadas perpendicularmente ao feixe de luz. É surpreendente a frequência com que se vê um estudante a lutar com um sistema óptico porque alguma lente importante está coberta por um filme de gordura, alguns milimetros alta ou baixa demais ou porque se encontra inclinada uma dezena de graus a partir da normal.

Em experiências de electricidade com fios presos a terminais, certifique-se que os fios têm as pontas limpas—raspe-os se necessário—e assegure-se que os terminais estão bem apertados de modo a não surgirem resistências de contacto elevadas. Se tiver que soldar duas pontas, lixar os fios primeiro, fazer em seguida uma junta mecânica tão sólida quanto possível e, ao soldar, deixar a solda fluir envolvendo a junção toda. Por fim, depois de arrefecida agitar os dois fios para se certificar que a solda aderiu aos dois fios e que não tem uma junta falsa. Quando utilisar um galvanómetro ou outro aparelho com diferentes gamas de sensibilidade, começar sempre pela gama menos sensível (com a maior escala). Quando estiver a montar circuitos que necessitem da tensão de rede, ligar a ficha da rede *sempre no fim*, e, se tiver que modificar alguma coisa, não confie no facto de ter desligado o interruptor principal, *desligue a ficha da rede*.

4.3 Erros pessoais

Quando está a fazer medidas deve considerar-se como uma peça de equipamento sujeito a erros tal como os outros. Deve tentar tomar consciência dos seus erros particulares. Por exemplo, ao estimar décimas de uma divisão numa escala, certas pessoas têm tendência para evitar certos números. Pode fácilmente fazer um teste pessoal sobre isto, embora este não seja um assunto de grande importância.

O que pode ser, no entanto, importante são os chamados erros 'desejosos.´ Toda a gente comete erros ao ler um instrumento ou ao fazer contas. Mas suponha que uma série de medidas está a dar resultados que pensa serem elevados demais. Pode, inconscientemente, começar a cometer mais erros do que é costume, e pior do que isso, provavelmente a maioria desses erros serão no sentido de diminuir os resultados. Naturalmente que se não souber de antemão qual o resultado que espera obter, este perigo é evitado. Mas, na maior parte dos casos isso não é possível embora possa ser por vezes conseguido por uma simples mudança no procedimento.

Por exemplo, suponhamos que está a cronometrar o tempo de 100 oscilações de um pêndulo com um cronómetro. Escreve

Leitura inicial	Leitura final	Tempo para 100 oscilações
0′ 0.2″	1′ 49.7″	1′ 49.5″

Mas a segunda leitura é um erro; deveria ser 1´ 39.7″. Depois de pôr o cronómetro a zero repete a medida. O ponteiro chega aproximadamente à mesma posição. Como está à espera de um resultado de cerca de 1´ 49″, há uma forte probabilidade de cometer o mesmo erro novamente. E, é claro, não há nada que o alerte para este erro, os número parecem tão bonitos e consistentes.

Mas suponhamos que não põe o cronómetro a zero. Depois da segunda centena de oscilações este marca 3´ 19.1″, que escreve correctamente no livro de notas. Aparentemente o segundo conjunto de 100 oscilações demorou 1´ 29.4″, e o facto de haver um erro salta imediatamente aos olhos. Note-se que, mesmo que tivesse cometido o mesmo erro uma segunda vez e escrito 3´ 29.1″, saberia, depois da subtração que algo estava errado.

De um modo geral cometem-se menos erros se estiver confortável—fisicamente e mentalmente. Vale a pena procurar assegurar-se, particularmente quando realizar uma série longa de medidas, de que

i) Aparelhos que precisem de ser ajustados, e botões que devam ser manipulados, devem estar colocados convenientemente.

ii) O mesmo se aplica a instrumentos que vão ser lidos com frequência.

iii) A iluminação geral deve ser boa. (Numa experiência de óptica é necessário ter trabalho a *excluir* luz estranha.)

iv) Deve haver uma ventilação adequada. O ar num laboratório deve ser fresco e a sua temperatura não muito quente. (Actualmente o ideal é ter ar-condicionado.)

v) Finalmente deve haver um local conveniente para ter o livro de notas, de preferência longe de fontes de calor ou água.

4.4 Repetição de medidas

As medidas de uma quantidade única devem ser repetidas pelo menos uma vez. Esta repetição permite

(a) evitar erros na leitura dos instrumentos e no registo dos números,

(b) permite estimar o erro da medida.

Mas se estivermos a medir uma série de pares de valores (x,y) a partir dos quais pretendemos determinar, por exemplo, a inclinação m da melhor recta que passa pelos pontos, não é necessário medir y várias vezes para cada valor de x. Uma vez obtidos dois pares de valores, ou seja dois pontos na recta, temos um valor para m. Precisamos de mais valores de m, mas é melhor obtê-los fazendo mais medidas com valores de x diferentes, do que repetir as medidas para os mesmos valores de x.

Por vezes medimos pares de valores x,y e a função $y(x)$ não é uma linha recta. Suponhamos que y é a amplitude de oscilação de um sistema harmónico simples devida a uma força externa periódica de frequência x. Na Figura 6 mostra-se um conjunto típico de valores de x,y na vizinhança da ressonância. Neste caso os pontos devem estar suficientemente perto para

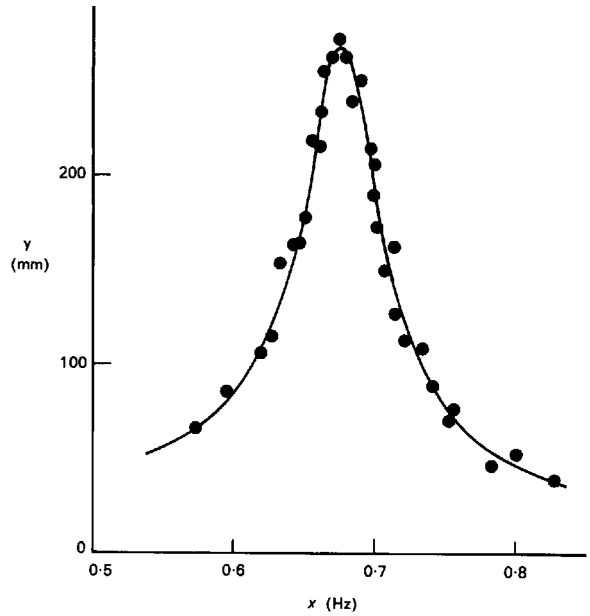


Fig. 6 - Amplitude de oscilação de um sistema harmónico simples em função da frequência da força externa.

definir a 'melhor' curva bastante bem.* Mas, tal como no caso da linha recta, não é necessário repetir as medidas. A dispersão dos pontos em torno da 'melhor' curva dá uma medida do erro, embora seja boa ideia repetir as medidas de y para um ou dois valores de x só para verificar.

Há um aspecto importante na repetição de medidas que pode ser ilustrado pelo seguinte exemplo. Um estudante numa aula prática aborda o professor com um dilema. Está a medir a ângulo de um prisma com um espectrómetro e obteve os seguintes resultados

* A proximidade dos pontos necessária para isso depende da forma da função e da precisão das medidas. As pessoas com pouca experiência estão tão habituadas a medir variações em linha recta, em que são necessários relativamente poucos pontos, que, quando investigam relações do género da que se mostra na Figura 6, muitas vezes não têm pontos suficientes para definir a curva.

$$56°30' \quad \text{e} \quad 60°\ 12'.$$

A sua estimativa para o erro é cerca de 5′ e, tendo verificado a aritmética, deduz que um dos resultados deve estar errado. (Pare de ler e considere o que faria neste caso.)

A sua pergunta ao professor é qual dos resultados deve tomar como correcto. Esta é uma pergunta ridícula. O objectivo da experiência é determinar alguma coisa. O estudante, até esse momento, não determinou nada, excepto que um dos seus valores está errado. (Possivelmente estão ambos erradas.) Nesta situação *tem que fazer mais medidas*. De facto, deve continuar a medir até que os resultados comecem a fazer sentido. Não pode fazer nada, nem mesmo a mais simples manipulação dos resultados, antes destes começarem a fazer sentido.

Se a medida seguinte desse 56° 34′, começaria a pensar que o segundo resultado estaria provavelmente errado. Deveria medir o ângulo mais uma vez e se o resultado fosse 56° 35′, teria a certeza disso. Os resultados começa a fazer sentido. Pode perguntar-se como foi obtido o valor 60° 12′, provavelmente nunca o descobrirá. O prisma pode ter sido movido durante a medida ou, o que é mais provável, um valor do telescópio foi mal lido ou registado incorrectamente. É irritante quando aparece um resultado errado que não sabemos como surgiu, mas, acontece e, desde que não ocorra com frequência, não é necessário preocupar-se. Mas deve preocupar-se quando, (a) tiver decidido arbitrariamente que o prisma é de 60° e, portanto, o segundo resultado é o correcto, ou (b) decidir fazer a média.

4.5 Cálculo de resultados

No Capítulo 7 vamos abordar esta questão com mais pormenor, aqui queremos só fazer notar que, de um modo geral, numa experiência que dure mais do que um dia ou dois, deve sempre tentar determinar os resultados à medida que vai fazendo a experiência.

É muito má prática recolher muitos resultados e só os tratar no fim da experiência. Em primeiro lugar, é muito mais fácil fazer os cálculos enquanto está tudo fresco na memória. Em segundo lugar, não é invulgar descobrir, quando se faz os cálculos de um conjunto de resultados, que há alguma coisa errada e é necessário modificar a aparelhagem. Ficará muito mais zangado se isto acontecer ao fim de um mês do que se acontecer ao fim de um dia. Para além disso, é muitas vezes necessário conhecer um resultado para saber o que fazer a seguir.

A coisa mais insensata que se pode fazer é desmanchar uma aparelhagem elaborada antes de ter calculado os resultados—já tem acontecido.

5

Registo Experimental

5.1 Introdução

Em qualquer experiência é sempre necessário manter um registo de tudo o que se faz. Este registo deve ser claro, conciso—e económico. Por um lado, não é muito conveniente perder muito tempo à procura de números de páginas sem títulos para encontrar um conjunto particular de resultados, ou tentar destrinçar, a partir de notas lacónicas, quais as condições em que um certo conjunto de medidas foi feito. Por outro lado, escrever notas tão claras e precisas que possam ser seguidas facilmente por outra pessoa qualquer, é uma tarefa laboriosa e poucas vezes necessária. O nosso objectivo deverá ser um registo que nós próprios possamos interpretar fácilmente passado, digamos, um ano da realização da experiência.

Vamos apresentar, neste capítulo, algumas sugestões e recomendações para o registo das experiências que realizarão agora, e no futuro. É importante fazer notar que o que irá ser apresentado não deve ser encarado como um conjunto de regras a seguir à risca, mas antes um conjunto de conselhos que lhes permita entrar no espírito da produção um registo—preciso, completo e claro—com um mínimo de esforço.

5.2 Livro de notas encadernado versus capa de folhas soltas

Algumas pessoas preferem um livro encadernado, outras usam folhas soltas. A vantagem de um único livro com as folhas presas é que se sabe sempre onde está tudo—no livro. Não há bocados de papel soltos que possam ser perdidos. A principal desvantagem é que qualquer experiência, mesmo de complexidade moderada apresenta uma progressão irregular e salta-se de uma parte para outra, sendo cansativo e confuso, ter as várias partes divididas em diferentes fragmentos de notas no livro.

A vantagem das folhas soltas é a sua flexibilidade. Todas as folhas de um tópico particular podem ser guardadas juntas independentemente do que se tiver feito entretanto. Esta flexibilidade é também útil noutro aspecto. O trabalho experimental requer o uso de diferentes tipos de papel—normal, quadriculado, de gráficos (milimétrico), ou de recolha de dados. (Este último tem linhas verticais sendo útil para trabalhos com tabelas de valores.) Estes diversos tipos de papel podem ser facilmente inseridos, em qualquer quantidade, em qualquer ponto de um livro de notas de folhas soltas.

É preferível não ser muito dogmático no que diz respeito ao método usado para o registo da experiência, mas usar o que melhor se adaptar à experiência particular que se estiver a realizar. As vantagens dos dois métodos podem mesmo ser combinadas usando uma mistura do livro encadernado e da capa de folhas soltas. Qualquer que seja o sistema adoptado é sempre boa ideia manter, pelo menos, *um* livro de notas encadernado; é um espaço para escrever coisas soltas—ideias ocasionais, outras medidas, referências da literatura, etc. É muito útil ter as páginas do livro de notas numeradas, e manter um índice actualizado no princípio, ou fim, do livro.

Esta combinação de livro de notas encadernado e capa de folhas soltas, não é geralmente necessária para alunos que realizem experiências de aulas práticas. Mas se as experiências que vão realisar forem da sua iniciativa, ou novas, então devem ser fortemente encorajados a manter um registo apropriado do que fizerem.

5.3 O registo de medidas

Todas as medidas devem ser registadas *imediatamente* e *directamente*. Esta regra não tem excepções. Não faça qualquer aritmética mental—mesmo a mais trivial—com uma medida antes de a escrever no papel. Suponha, por exemplo, que os números que lê num amperímetro devem ser divididos por 2 para reduzir a leitura a amperes. Primeiro escreva o número que lê no amperímetro no livro de notas. *Nunca* divida por dois e escreva o número depois. As razões deste procedimento são óbvias, Se fizer um erro na aritmética mental não será capaz de o corrigir nunca mais.

Ao registar uma medida, é sempre boa ideia verificar se o que escreveu está correecto olhando novamente para o instrumento. Ou seja

ler, escrever, verificar.

Tomar nota do número de série, e do modelo, de qualquer aparelho importante utilizado na experiência, por exemplo uma resistência padrão. Se o fabricante não lhe tiver dado um número de série deve atribuir-lhe um e gravá-lo no aparelho. A identificação de um aparelho em particular pode ser importante. Por exemplo, algo pode correr mal com a experiência, e, ao procurar as causas pode suspeitar de um instrumento defeituoso em cujo caso gostará de saber qual foi o que utilizou.

Todo o trabalho registado deve ter a data em que foi feito. Isto é particularmente importante no caso de se efectuar o registo em folhas soltas pois a ordem em que estas são guardadas não tem nada a ver com a sequência em que foram escritas. O livro encadernado tem uma vantagem neste aspecto pois todo o trabalho é automáticamente registado por ordem de execução. Apesar disso deve-se sempre datar todas as observações.

5.4 Nunca copiar

Um péssimo hábito de muitos estudantes é registar as observações em papel de rascunho e depois copiá-las para um livro 'bonito', deitando fora os originais. Podem-se apontar três objecções para isto:

(a) É uma perca de tempo.

(b) Há a possibilidade de cometer erros ao copiar.

(c) É quase sempre impossível evitar a tentação de ser selectivo.

Esta última objecção é a mais importante. Na maior parte das experiências que realizamos, nunca utilizamos todas as medidas. A maior parte das vezes decidimos que certas medidas não são muito úteis, ou foram feitas em condições erradas, ou simplesmente não são relevantes para o fenómeno em estudo. Por outras palavras, somos selectivos. Esta selecção é um procedimento correcto desde que as razões dessa selecção sejam objectivas e tenham que ver com o fenómeno em estudo. *Mas é muito importante que se guardem todas as medidas originais*. Podemos querer fazer uma selecção diferente para testar uma hipótese. E de qualquer modo, todos os resultados experimentais devem estar disponíveis para que outra pessoa possa formar uma opinião acerca da validade da nossa selecção, ou mesmo de qualquer aspecto das medidas originais.

Um dos aspectos importantes dos cursos laboratoriais é treinar-se a manter registos claros e eficientes. Quando fazem os primeiros registos directos é natural que fiquem um bocado confusos e sejam difíceis de seguir, mas não devem desencorajar-se. Com o tempo, e a prática, ficarão cada vez melhores. As notas nunca ficam tão 'bonitas' e limpas como a versão copiada, mas isso é irrelevante. O importante é a clareza e honestidade científica, não a beleza.

Tendo tornado claro este ponto, podemos acrescentar que, por vezes, *copiar resultados* pode ser útil. Por vezes ajuda a tornar claros registos confusos o que pode ser desejável, não só por isso mesmo, mas também porque pode diminuir os erros cometidos ao realizar os cálculos para obter os resultados. Também sucede muitas vezes, que a certa altura queremos juntar diversos resultados espalhados em diferentes pontos do livro de notas para fazer um gráfico, ou simplesmente para ver os números todos juntos.

Não há qualquer objecção neste tipo de cópia em ser altamente selectivos pois mantemos os dados originais.

5.5 Diagramas

'Uma figura vale por mil palavras'—provérbio Chinês.

Nunca é demais frisar a importância do uso de diagramas no registo de uma experiência. Um diagrama, combinado com umas palavras de explicação, é quase sempre a melhor maneira de explicar o princípio de uma experiência, descrevendo o aparelho e introduzindo a notação a utilizar. Consideremos a duas descrições seguintes de um sistema para investigar o movimente de dois pêndulos acoplados:

Descrição 1. Um pedaço de cordel é preso a uma barra horizontal em dois pontos A e B. Duas esferas S_1 e S_2 foram suspensas, por meio de cordéis, ao cordel original por meio de nós deslizantes nos pontos P_1 e P_2. Os comprimentos AB, AP_1, BP_2 e P_1P_2 são designados por a, y_1, y_2 e x respectivamente. A distância de P_1 ao centro de S_1 é designada por l_1, e de P_2 ao centro de S_2 por l_2.

Variou-se o grau de acoplamento entre os dois pêndulos variando a distância x. Isto foi realizado movendo os nós P_1 e P_2 ao longo do cordel AP_1P_2B, mantendo o sistema simétrico, ou seja y_1=y_2.

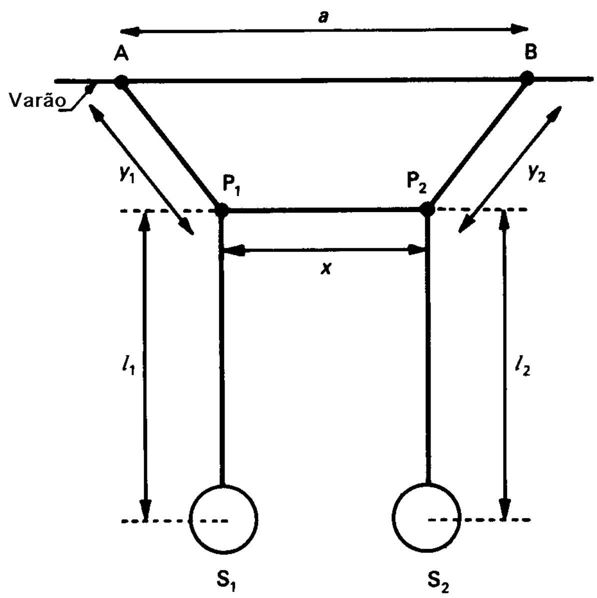


Fig. 7 - Pêndulos acoplados.

Descrição 2. O aparelho utilizado encontra-se esquematizado na Figura 7.AP_1P_2B é um pedaço contínuo de cordel.

P_1 e P_2 são nós deslizantes.

O acoplamento é variado mudando x por meio dos nós deslizantes— $y_1 = y_2$ sempre.

Qualquer comentário às duas descrições é supérfluo.

Um diagrama não deve ser uma representação artística, ou fotograficamente verdadeira, do aparelho. Deve ser esquemático e tão simples quanto possível, indicando sómente as características relevantes para a experiência. Além disso, embora um desenho feito aproximadamente à escala, seja por vezes útil, não deve hesitar em distorcer a escala noutro diagrama para realçar qualquer ponto em particular.

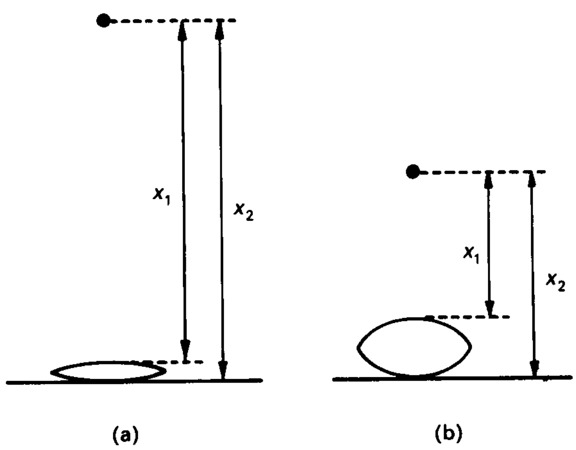


Fig. 8 - Diagrama para o método da determinação da distância focal de uma lente pelo método da imagem coincidente.

Suponha, por exemplo, que está a medir a distância focal de uma lente convexa colocando-a num espelho plano e observando quando é que um objecto e a sua imagem estão coincidentes. Desejamos indicar se uma medida particular se refere à distância do objecto ao cimo ou ao fundo da lente. A Figura 8a está desenhada à escala; a Figura 8b não está à escala, mas é mais clara para o fim em vista.

Um diagrama é também a melhor maneira de mostrar uma convenção de sinal ou de direcção. Considere a Figura 9, que mostra a convenção usual para representar uma rotação por um vector. Exprimir esta convenção por palavras é, não só mais difícil, mas também menos eficaz.

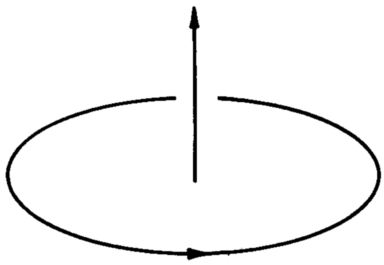


Fig. 9 - Diagrama mostrando a convenção para representar a rotação por um vector.

5.6 Tabelas

Deve-se sempre registar as medidas numa tabela. É compacto e fácil de seguir. Medidas da mesma quantidade devem ser registadas, de preferência, verticalmente, porque o olho compara mais fácilmente números dispostos na vertical. Dê um título a cada coluna com o nome da grandeza e/ou o seu símbolo, seguido das unidades.

Por conveniência, a potência de 10 numa unidade deve ser escolhida de modo que os valores registados estejam mais ou menos na gama de 0.1 a 1000. Infelizmente há duas convenções para exprimir as potências de 10 nas unidades. Considere a Tabela 5, que pode ser considerada como a primeira linha de uma tabela maior que dê os valores do módulo de Young para várias substâncias.

Tabela 5: Primeira linha de uma tabela mostrando as duas maneirras de exprimir unidades. Deve-se preferir a forma usada na segunda coluna.

Substância	*Módulo de Young* *(10^{11} Nm^{-2})*	*Módulo de Young x 10^{-11}* *(Nm^{-2})*
ferro	2.11	2.11

O módulo de Young para o ferro é 2.11×10^{11} Nm^{-2}. Na coluna 1 mostra-se este valor expresso na primeira convenção e na coluna 2 na segunda. A segunda convenção parece menos natural; além disso o factor $\times 10^{-11}$ aparece, por vezes, deslocado, de modo que pode parecer que o valor do módulo de Young é 2.11×10^{-11} Nm^{-2}. Por este motivo é fortemente sugerido que se utilize sempre a primeira convenção, em que a quantidade física é simplesmente seguida pela unidade—neste caso 10^{11} Nm^{-2}. É mais directo e difícil de ser mal interpretado. (Note que, nesta convenção, o sinal de multiplicação não aparece.)

Uma vez espicificada a unidade no cimo da coluna não é necessário repeti-la em cada medida. De um modo geral toda e qualquer repetição deve ser evitada. É uma perca de tempo e de energia, e enche o registo de números inúteis. Quanto mais se reduzir tudo ao essencial mais fácil se torna seguir o essencial.

5.7 Clareza

Diagramas e tabelas são duas coisas que ajudam a aumentar a clareza dos registos. Qualquer outras ajudas à clareza são sempre bem vindas. Deve-se separar bem grupos de medidas de quantidades diferentes e deve-se dar um título a cada uma delas. Se um conjunto de valores conduz a um resultado, por exemplo uma média, é útil não só dizer o que é, mas também sublinhá-lo ou fazê-lo sobressair de alguma maneira.

Não se deve ser muito económico em papel. Muitas vezes começará umas medidas sem lhes ter dado um título, ou sem ter espicificado as unidades. O hábito de deixar algumas linhas antes de escrever qualquer coisa permite adicionar esta informação posteriormente de modo claro. Não pôr títulos logo que se começa não é necessariamente má prática ou sinal de impaciência, mas sim de bom senso. Em geral, depois de fazer alguns conjuntos de medidas os título que juntar serão de uma natureza mais útil e extendidos.

Um obstáculo claro à clareza é o hábito de escrever por cima. Será 37, 27 ou 37? Não se deve deixar o leitor—ou nós próprios, noutra altura—embaraçados com isto. Deve-se riscar o valor e reescrevê-lo, ~~27~~ 37.

5.8 Alguns erros comuns—ambiguidade e indefinição

Exemplo 1. Pede-se a um estudante para medir a viscosidade da água a 20°C e para comparar o valor obtido com o de uma tabela de constantes físicas. Aparece o seguinte no seu livro de notas:

valor experimental	1.005×10^{-3} N s m^{-2}
valor correcto	1.005×10^{-3} N s m^{-2}

Qual é o seu valor e qual é o das tabelas? Se soubermos que ele é uma pessoa modesta, podemos pensar que o que ele chama 'valor experimental' é o seu valor, e o que ele chama 'valor correcto' é o das tabelas. Se ele for presunçoso pode ser ao contrário. Mas evidentemente que não temos que adivinhar de acordo com a sua personalidade ou outra coisa qualquer. O que ele deveria ter escrito era algo no género de:

esta experiência	1.005×10^{-3} N s m^{-2}
Kaye & Laby (13ª Ed. pg.37)	1.005×10^{-3} N s m^{-2}

Deve também evitar-se outros adjectivos ambíguos neste contexto como 'actual', 'oficial', 'medido', ´verdadeiro'.

Note-se que se deu a referência detalhada da tabela. Poderíamos querer verificar o valor ou consultar novamente a tabela.

Exemplo 2. Considere uma entrada num livro de notas assim:

Amperímetro A14 erro zero -0.03 A

Quer isto dizer que quando não passava corrente no amperímetro se lia -0.03 A, e, portanto, devemos *adicionar* 0.03 a todas as medidas com esse instrumento para obter o valor correcto, ou significa que devemos *subtrair* 0.03? Novamente temos que adivinhar as intenções do experimentador.

De acordo com a regra de que as medidas devem ser registadas directamente, sem qualquer intervenção aritmética mental, o que o experimentador deve fazer é ler o instrumento quando não passa corrente e escrever esse valor. Assim aquela entrada no livro deve ser do género de:

Amperímetro A14
-0.03 A ← leitura quando não passa corrente

Exemplo 3. A seguinte afirmação é muito vulgar em registos de pessoas inexperientes:

'O cronómetro foi comparado com um relógio padrão e verificou-se que era preciso dentro do erro experimental.'

Esta afirmação não é muito correcta, em parte porque a frase 'preciso dentro do erro experimental' é vaga e tem significados diferentes para pessoas diferentes, e principalmente porque a *prova* da afirmação não é dada. O que deveria ter aparecido era o seguinte:

<u>Calibração do cronómetro S29</u>

		min	seg
cronómetro	inicial	12	38.4
	final	27	38.6
		15	00.2 ± 0.3 seg (estimado)
relógio padrão		15	00.0

<u>Conclusão</u> O erro no cronómetro é desprezável

Os exemplos anteriores ilustram os seguintes pontos:

(a) As afirmações feitas não devem ser ambíguas. Deve-se interrogar se haverá outra interpretação, para além da correcta, acerca do que escreve. Muitas vezes a maneira de resolver uma possível ambiguidade é dar um exemplo numérico.

(b) Se uma conclusão se baseia em provas numéricas, como quase todas as conclusões em experiências de física devem, ou deviam, ser baseadas, então deve *escrever os números explicitamente.*

6

Gráficos

6.1 A utilização de gráficos

Os gráficos têm três usos principais em física experimental. O primeiro é ajudar na determinação do valor de uma quantidade qualquer, geralmente a inclinação ou a ordenada na origem duma linha recta que represente a relação entre as variáveis. Embora este aspecto do uso de gráficos seja muito realçado no ensino elementar de física prática, ele é de facto um uso pouca relevante. Quer determinemos a inclinação de uma recta pelo método dos mínimos quadrados, quer utilizando os pontos aos pares, naturalmente que não estamos a utilizar o gráfico propriamente dito mas os valores numéricos dos pontos indicados. A única altura em que se utiliza de facto o gráfico para a determinação da inclinação, é quando desenhamos a melhor recta através dos pontos a olho. Este é um método muito grosseiro—embora não se deva desprezar por isso—que só deve ser utilizado quando se quer verificar o valor determinado por um método mais sofisticado, ou quando o valor da inclinação não tem grande importância no resultado final.

O segundo uso de gráficos é muito mais importante. Servem de *ajuda visual*. Suponha, por exemplo, que mede a taxa do fluxo de água num tubo em função do gradiente de pressão, com o objectivo de determinar quando é que o fluxo deixa de ser laminar e passa a turbulento. Na Tabela 6 mostram-se um conjunto de valores do artigo original de Reynolds sobre o fluxo turbulento—Reynolds 1883. Enquanto o fluxo é laminar a velocidade é proporcional à diferença de pressão. Olhando só para os números da tabela é muito difícil dizer quando é que se perde a relação de proporcionalidade. No entanto, se os números forem desenhados num gráfico (Figura 10), esse ponto é imediatamente aparente.

Tabela 6: Fluxo de água através de um tubo

Gradiente de pressão *($N\ m^{-3}$)*	*Velocidade média* *(mm s-1)*
7.8	35
15.6	65
23.4	78
31.3	126
39.0	142
46.9	171
54.7	194
62.6	226
78.3	245
86.0	258
87.6	258
93.9	271
101.6	277
109.6	284
118.0	290

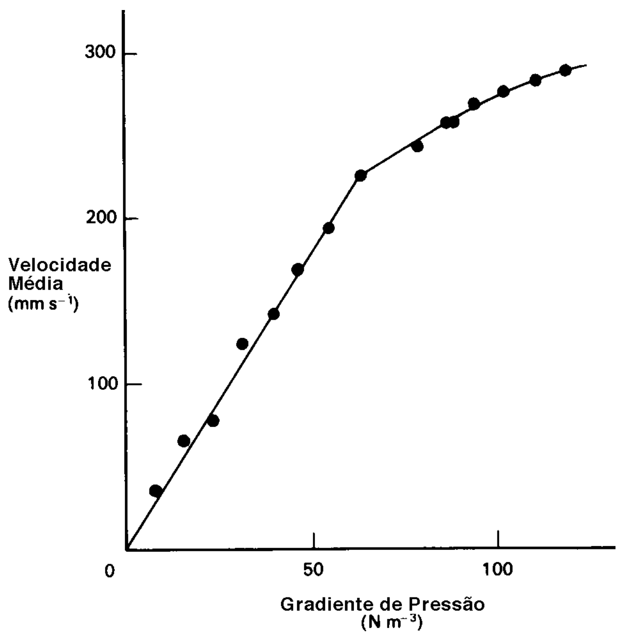
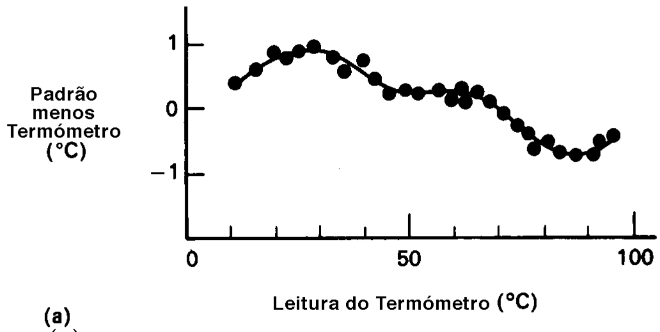


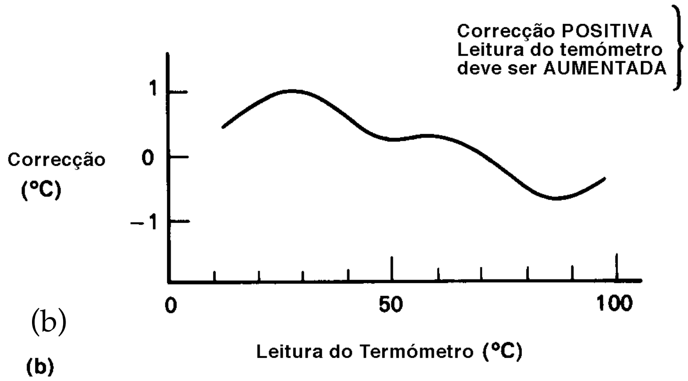
Fig. 10 - Velocidade média da água num tubo em função do gradiente de pressão—gráfico dos valores da Tabela 6.

Outro exemplo desta utilização visual, é a comparação de valores experimentais com uma curva teórica, desenhando ambos no mesmo gráfico. Por outro lado, mostrar os resultados num gráfico é sempre uma grande ajuda para se 'ver' o que se está a passar na experiência.

O terceiro uso de gráficos é a obtenção de relações empíricas entre duas quantidades. Por exemplo, ao calibrar um termómetro por comparação com um padrão, podemos determinar o erro em função da leitura do termómetro (Figura 11a). Desenha-se uma curva suave através dos pontos medidos e utilizamos essa curva (Figura 11b) para corrigir as leituras do termómetro. Em geral pode fazer-se o mesmo compilando uma tabela de valores de correcção. Uma tabela é, em geral, mais prática de utilizar que um gráfico, mas pode ser mais difícil de compilar.



(a)
(a)



(b)
(b)

Fig. 11 - (a) Medidas de calibração de um termómetro e (b) a curva de correção.

Uma convenção bem estabelecida em física (e, de facto, em todas as ciências) para gráficos, é colocar a variável independente, ou seja, aquela que é escolhida pelo experimentador de cada vez que faz uma medida, no eixo horizontal (eixo x), e colocar a variável dependente, ou seja, aquela que é medida, no eixo vertical (eixo y). Ou seja; colocar a *causa* no eixo horizontal e o *efeito* no eixo vertical.

6.2 Tipos de escalas

Existe papel de gráfico com uma grande variedade de tipos de escalas (linhas marcadas no papel para ajudar a marcar os pontos), sendo a maior parte especializados para certas aplicações. Os que se utilizam mais vulgarmente em física são os que têm escalas lineares (papel milimétrico vulgar) e escalas logarítmicas (papel logarítmico). Este último pode ser dividido em dois tipos consoante a divisão logarítmica seja só num dos eixos (papel semi-logarítmico) ou nos dois (papel log-log)—ver a Figura 12. O papel semi-logarítmico é útil quando há uma relação logarítmica ou exponencial entre as duas variáveis. O papel log-log é útil quando a relação for da forma

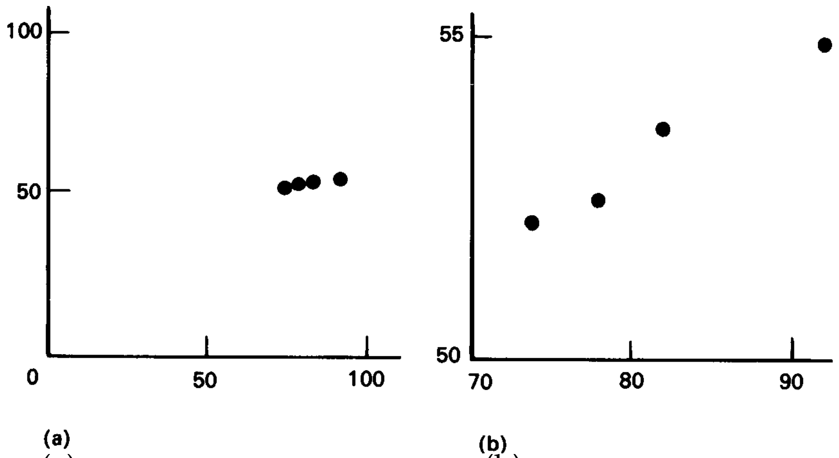
$$y \approx x^p \,,$$

e o valor de p não é conhecido.

6.3 Escalas

Suponhamos que estamos a utilizar papel com divisões de 1 cm e sub-divisões de 1/10 cm. A escolha da escala deve ser feita tendo em conta o seguinte:

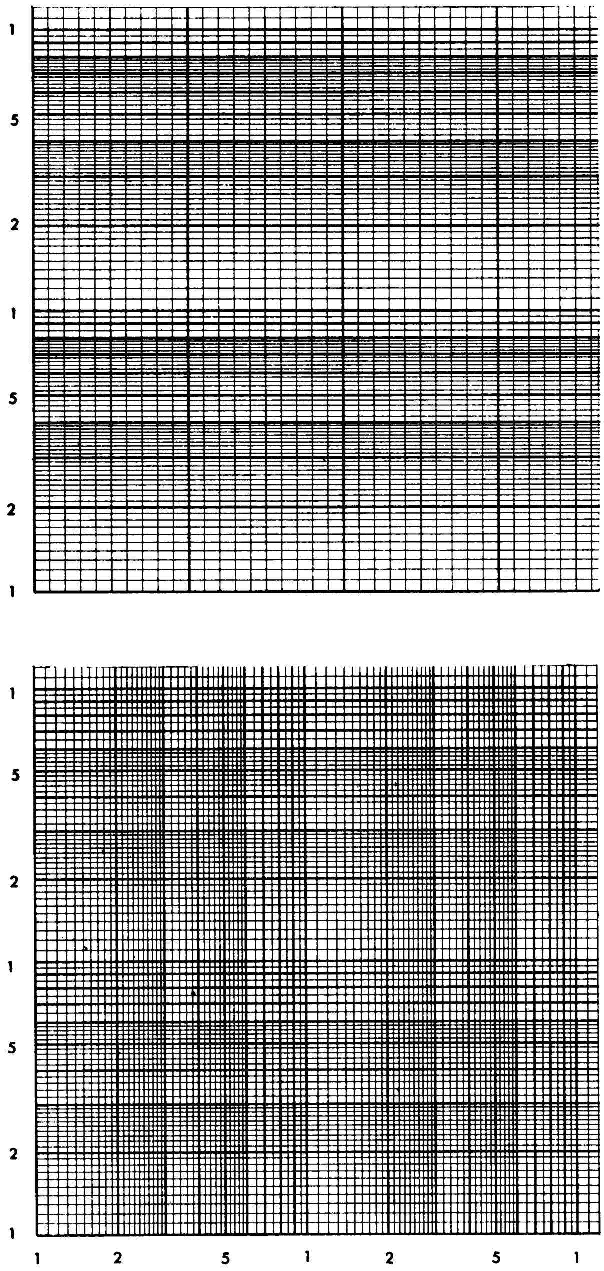
(a) Os pontos experimentais não devem ficar muito juntos. É um



(a) (b)

Fig. 13 - (a) não é um gráfico muito útil. Os mesmos valores ficam melhor numa escala expandida como em (b).

bocado difícil extrair alguma coisa da Figura 13a. Devemos escolher uma escala que faça espalhar os pontos pela folha do gráfico como na Figura



(a)

(b)

Fig. 12 - Papel para gráficos com divisões logarítmicas. a) semi-log, b) log-log.

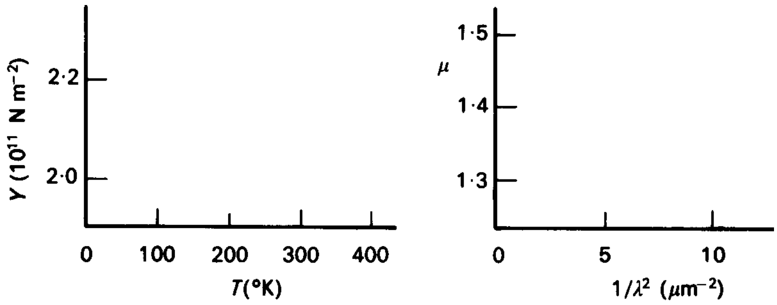
13b. No entanto, ao fazer isto devemos ter em consideração dois pontos adicionais.

(b) A escala deve ser simples. O mais simples é 1 cm na folha representar uma unidade (ou 10, 100, 0.1, etc) da quantidade medida. A seguir, o mais simples é 1 cm na folha representar 2 ou 5 unidades. Qualquer outra escala deve ser evitada para evitar cálculos mentais complicados quando se quer adicionar, ou ler os valores de, um ponto.

(c) Por vezes, temos que escolher uma determinada escala por motivos teóricos. Assim, se estivermos a investigar se os resultados da Figura 13 satisfazem a relação $y=mx$, devemos incluir a origem no gráfico de y em função de x, e a Figura 13b não está correcta. (Isto não quer dizer que tenhamos que regressar à Figura 13a—ver a página 71.)

6.4 Unidades

Geralmente, é conveniente escolher a potência de 10 na unidade do mesmo modo que para as tabelas (ver a página 56). As marcas do gráfico podem ser legendadas 1, 2, 3,… ou 10, 20, 30,… em vez de 10 000, 20 000, etc., ou 0.00001, 0.00002, etc.



(a) (b)

Fig. 14 - Exemplos de legendas de eixos e modos de exprimir as unidades. (a) Módulo de Young Y em função da temperatura T. (b) Índice de refracção μ de um vidro em função de $1/\lambda^2$, em que λ é o comprimento de onda da luz.

Os eixos devem ter sempre uma legenda com o nome ou o símbolo (ou ambos) da quantidade representada. A unidade deve ser representada com a mesma convenção das tabelas, ou seja, a potência de 10 deve ser incluída na unidade. Pode-se ver alguns exemplos na Figura 14.

6.5 Alguns conselhos para desenhar gráficos

O principal objectivo de um gráfico é dar uma impressão visual dos resultados fazendo-o de um modo o mais claro possível. Em seguida apresentam-se alguns conselhos gerais para desenhar gráficos. Estes devem ser interpretados e modificados de acordo com o caso particular.

(a) Se se desenhar uma curva teórica para comparação com os resultados experimentais, os pontos teóricos calculados para desenhar a curva devem ser escolhidos arbitrariamente e não devem aparecer no gráfico final. Marcá-los a lápis ligeiramente para depois serem apagados.

Por outro lado os pontos experimentais devem ser marcados com marcas bem visíveis—e não pontos pequeninos—para que sobressaiam claramente—Figura 15.

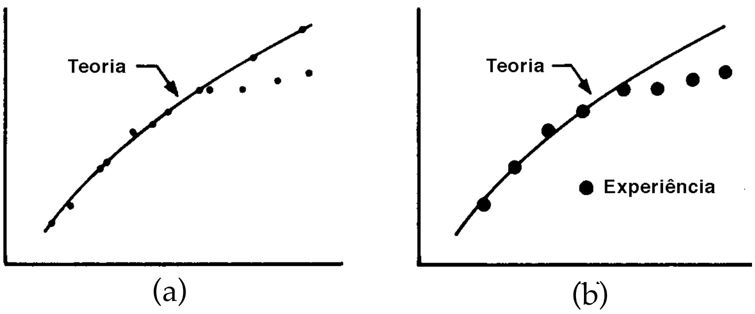


Fig. 15 - (a) Um mau gráfico— os pontos experimentais são pequenos e não se distinguem dos pontos calculado para desenhar a curva teórica. Em (b) os pontos calculados foram apagados e os pontos experimentais estão proeminentes.

(b) Por vezes é útil desenhar uma curva suave (não teórica) que passe pelos pontos experimentais. Estas curvas são úteis para dar continuidade à nossa leitura do gráfico. Note-se que a curva deve ser *suave*. Os principiantes, em geral, juntam os pontos como se mostra na Figura 16a. Mas isto

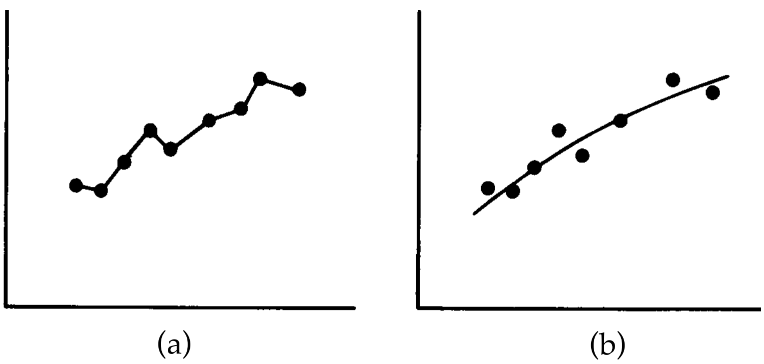


Fig. 16 - (a) está incorrecto—implica que a relação entre as duas variáveis tem a forma irregular mostrada, o que é improvável. Dos valores experimentais esperaríamos que a relação seja algo parecido com a curva em (b).

implicaria que a relação entre as duas variáveis tem a forma irregular mostrada, o que, excepto em circunstâncias verdadeiramente excepcionais, é muito pouco provável. A forma esperada dessa relação deveria ser qualquer coisa do género da curva da Figura 16b.

Se se incluir uma curva teórica no gráfico deve-se suprimir a curva pelos pontos experimentais. Esta pode implicar mais do que os resultados mostram e tornam confusa a comparação entre a teoria e a experiência.

(c) Deve-se utilizar símbolos diferentes (por exemplo, m, l, 5, I, etc.), ou cores diferentes, para distinguir pontos experimentais que se refiram a diferentes condições ou diversas substâncias. No entanto, estes devem ser utilizados com moderação, se o gráfico começar a ficar muito sobrecarregado é melhor desenhar cada conjunto num gráfico individual.

Este mecanismo dos símbolos diferentes é talvez mais útil quando se pretende demonstrar que a variação das condições ou do material não tem qualquer efeito nos resultados. Na Figura 17 mostra-se o exemplo da variação da capacidade calorífica a volume constante, C_v, por kilomole de substância, em função de T/θ. T é a temperatura absoluta, e θ, conhecida como a temperatura de Debye, é uma constante que depende da substância. De acordo com a teoria de Debye para os calores específicos, a relação entre C_v e T/θ é a mesma para todos os sólidos. Na figura mostram-se alguns valores para o chumbo ($\theta = 88$K), prata ($\theta = 215$K), cobre ($\theta = 315$K)e diamante ($\theta = 1860$K), juntamente com a forma da curva prevista pela teoria de Debye. Pode ver-se fácilmente que, para estas substâncias, os resultados experimentais estão de acordo com a teoria.

Note-se que a quantidade colocada no eixo y é $C_v/3R$, em que R é a constante dos gases perfeitos. Este é um procedimento comum em física, exprimir uma quantidade física em termos de uma unidade natural. Neste caso, $3R$, é o valor de C_v previsto pela teoria clássica, e também pela teoria de Debye, no limite de temperaturas elevadas ($T \gg \theta$).

(d) É sempre melhor começar por desenhar os eixos e os pontos experimentais a lápis. Por vezes muda-se de opinião quanto à escala e também sucede colocar um ou outro ponto experimental num local errado. Quando se der por satisfeito com a escala e a posição dos pontos pode fácilmente passar tudo a tinta e desenhar os símbolos visíveis para os pontos experimentais. Este procedimento evita alterações pouco claras e o desperdício de papel, e tempo, a redesenhar vários gráficos sucessivamente.

(e) Sempre que se utilize um programa de computador para fazer os gráficos é necessário verificar com cuidado os números que ele utiliza, quer olhando para possíveis discrepâncias no desenho final, quer pedindo ajuda a um colega para ditar os números enquanto os verificamos no computador.

6.6 Indicação dos erros

Os erros nos pontos experimentais são em geral indicados por meio de barras (barras de erro) do seguinte modo

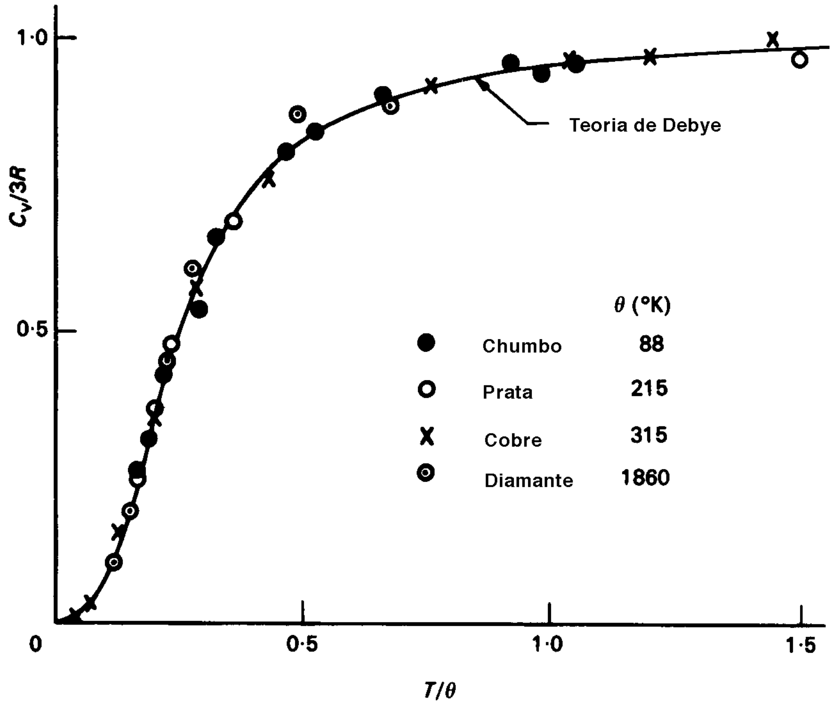
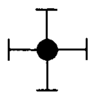
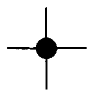


Fig. 17 - Calor específico C_V, em unidades de $3R$, em função de T/θ para o chumbo, prata, cobre e diamante.

 ou 

ou, no caso do número de pontos ser muito elevado e ficarem muito próximos uns dos outros

 ou 

Uma vez que a introdução dos erros experimentais representa trabalho adicional e complica o desenho do gráfico, só deve ser feito se a informação do erro for relevante. Ganha-se pouco, por exemplo, pela adição das barras de erro aos pontos nas figuras 6 ou 17.

Por outro lado o significado do desvio relativamente a uma curva teórica pode depender dos erros estimados, e, nesse caso, devem-se indicar os erros. Assim na Figura 18a os desvios não são considerados significativos enquanto que na Figura 18b sim. Já nos deparámos com esta situação na página 35 onde a dispersão dos resultados não era consistente com os erros. Nesse caso a curva teórica é a linha recta

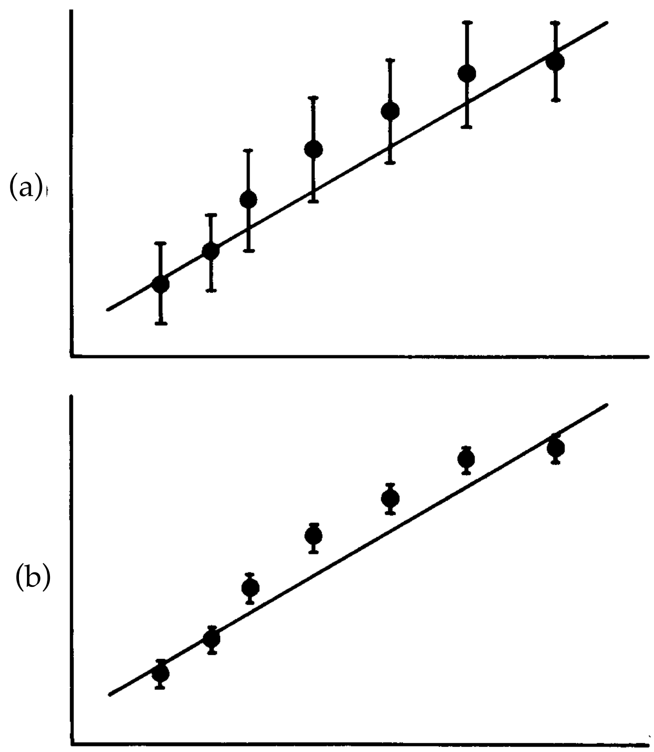


Fig. 18 - Os desvios são os mesmos nas duas figuras, mas, em (a) provavelmente não são significativos, enquanto que em (b) provavelmente são.

velocidade do som = constante.

Desenhar os pontos experimentais com os seus erros respectivos—Figura 3—é uma maneira útil de mostrar essa discrepância.

Outra situação em que se costuma mostrar os erros é quando eles têm valores diferentes para os vários pontos experimentais.

6.7 Sensibilidade

Suponhamos que realizamos uma experiência para verificar se a relação

$$y = x$$

é válida. Obtemos pares de valores para x e para y e descobrimos que a relação é aproximadamente verdadeira. Se desejarmos mostrar os resultados graficamente, podemos desenhar y em função de x—Figura 18a. É no entanto, muito mais sensível desenhar $y - x$ em função de x, porque, como $y - x$ é um valor pequeno quando comparado com y, podemos utilizar uma escala mais expandida—Figura 18b. O desvio em relação à equa-

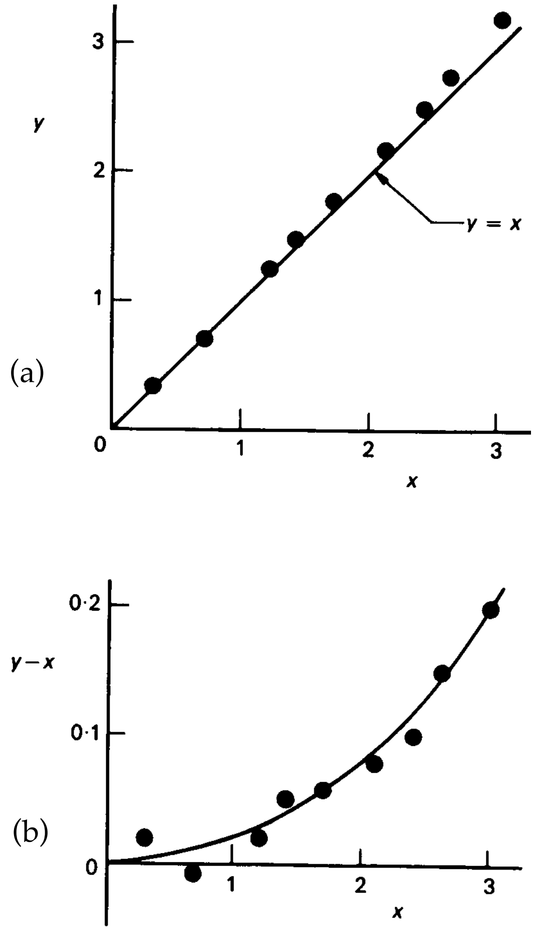


Fig. 19 - (a) *y* em função de *x*, e (b) *y-x* em função de *x*.

ção $y = x$, ligeiramente indicado na primeira figura, é bem evidente na Figura 18b.

Um método semelhante pode ser aplicado à relação

$$y = mx$$

Um gráfico directo de y em função de x dá uma ideia geral da relação e pode ser utilizado para isso—Figura 18a. Mas se desenharmos a relação y/x em função de x a sensibilidade é maior. Não temos que incluir a origem como no gráfico directo, mas podemos usar a gama que mais nos interessa—Figura 18b.

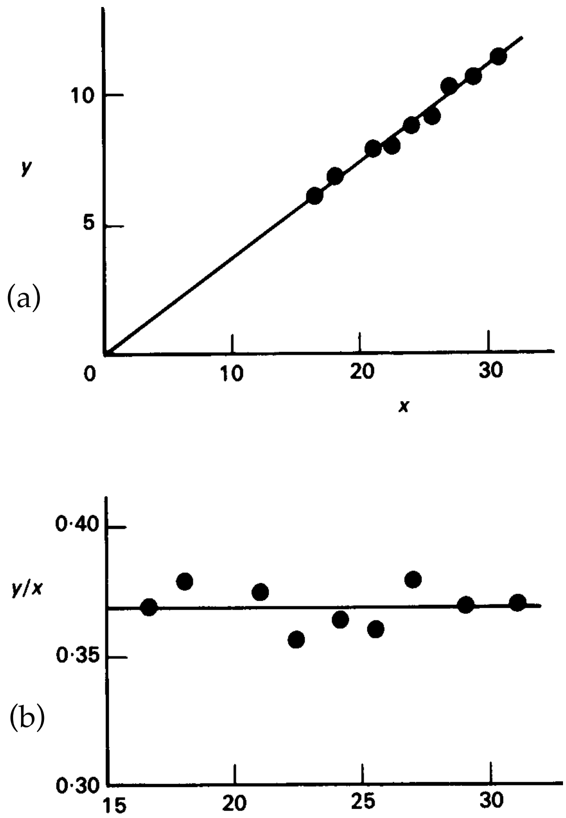


Fig. 20 - (a) *y* em função de *x*, e (b) *y/x* em função de *x*.

7

Aritmética

7.1 A importância da aritmética

O objectivo de uma experiência é, geralmente, a determinação de um, ou vários, números e a maneira correcta de os obter é tão importante como as medidas realizadas com esse fim.

Por vezes comete-se o preconceito de considerar a aritmética trivial e pouco importante, e que a incapacidade de fazer as contas correctamente é, por algum motivo obscuro, demonstração de génio matemático. Um outro preconceito é considerar que os erros de aritmética são actos de 'Deus' fora do nosso controle. A resposta a este último é que, embora todos estejamos sujeitos a cometer erros, em primeiro lugar, é possível reduzir a probabilidade de acontecerem com procedimentos adequados, e, em segundo lugar, há um remédio que se chama *verificar* os cálculos. Vamos considerar estes dois pontos seguidamente.

7.2 Modos de reduzir erros de aritmética

(a) Evitar cálculos desnecessários. Quantos menos cálculos fizer menos oportunidades terá para cometer erros, e é menos cansativo.Vejamos alguns exemplos de como evitar cálculos excessivos.

(i) Suponha que realiza uma experiência simples para determinar a constante elástica de uma mola, K, definida pela equação

$$F = kx, \tag{6-1}$$

em que F é a força aplicada, em newtons, e x é a extensão resultante, em metros. Dispondo de um conjunto de pesos com 1, 2, 3 …, 6 kg, mede as extensões produzidas por cada um. Em seguida multiplica o valor de cada peso por 9.81 para obter os valores em newtons? Seria tolice fazê-lo pois isso envolve seis multiplicações e, além disso, iria converter seis inteiros simples em seis números reais (mais extensos, ou seja com mais dígitos).

A maneira correcta de proceder é efectuar todos os cálculos para obter o melhor valor de K mantendo F na forma de inteiro (em kg, portanto). Só no fim se efectua a conversão de K, que está em unidades de kg-peso por metro, para newtons por metro multiplicando por 9.81.

(ii) Suponha que realiza-se uma outra experiência em que se medem, com cronómetros, os períodos T_1, T_2 e T_3 de três osciladores diferentes. A quantidade a determinar é dada pela expressão

$$Z = aT_1^2\left(b + c\frac{T_2^2}{T_3^2}\right). \tag{6-2}$$

Depois de calibrar o cronómetro correctamente verifica-se que 1800 segundos num relógio padrão correspondem a 1800.8 segundos no cronómetro. Vai em seguida multiplicar cada medida de T_1, T_2 e T_3 por 18 000/18 008? Isto seria novamente tolice.

Em primeiro lugar deve reparar que os valores de T_2 e T_3 entram na expressão de Z como uma razão e, portanto, não é necessário corrigi-los (seria equivalente a multiplicar o numerador e o denominador daquela fracção pelo mesmo número). A correção deve ser feita uma só vez no valor final de T_1—ou o que é equivalente no valor final de Z. É inútil realizar a correcção em cada valor de T_1. Em segundo lugar, não deve fazer a correcção por multiplicação do valor final de Z por $(18\,000/18\,008)^2$. Uma vez que Z é proporcional a T_1^2, a variação percentual de Z é o dobro da variação percentual de T_1. A correcção a T_1 é uma redução de 8 partes em 18 000, portanto, o que deve fazer é reduzir Z de 16 partes em 18 000.

(b) Ser metódico. Os cálculos devem ser realizados, e dispostos, de modo sistemático e tão ordenadamente quanto possível. Espaçar os cálculos liberalmente, cálculos dispostos apertadamente e pouco limpos são uma fonte de erros.

A maioria das observações feitas relativamente ao registo de medidas também se aplicam a cálculos. É sempre conveniente dispor os números de modo tabular. Frequentemente, os números numa coluna são o resultado da manipulação de números de colunas anteriores. Todas as colunas devem ter um cabeçalho indicando o que contém e/ou qual o tipo de manipulação efectuada. Actualmente utilizam-se muito as folhas de cálculo em computadores, pois estes programas têm a possibilidade de definir, numa célula, uma função a ser calculada com os valores de outras células. Estes cálculos são definidos uma só vez e depois são aplicados a todos os valores medidos. Estes programas têm a vantagem de realizar a aritmética por nós sem erros e com os dados e os resultados já dispostos de modo tabular. No entanto, quando utilizar programas deste tipo deve sempre ter muito cuidado ao definir a função a calcular, e experimentar o seu funcionamento com um ou mais valores cujo resultado seja conhecido, antes de mandar o programa fazer todos os cálculos automáticamente.

7.3 Verificar a aritmética

A verificação das contas deve ser considerada uma parte integrante das operações de cálculo. O experimentalista encontra-se exactamente na mesma situação que um fabricante de automóveis. Este último tem sempre um departamento de inspecção final dos automóveis antes de sairem da fábrica. É uma parte imprescindível do processo de fabricação sendo incluído no custo de produção do automóvel. Do mesmo modo uma parte do nosso tempo e esforço, deve ser dedicado à verificação das contas. Isto é igualmente válido quando se utilizam computadores para realizar os cálculos. Apesar disso depende de cada um a rentabilização do esforço posto nessa tarefa, ou seja diriji-lo para onde seja mais necessário. Numa experiência alguns cálculos são mais importantes que outros e, por isso, devem ser verificados com mais cuidado.

Podemos dividir os cálculos em duas categorias a que podemos chamar 'auto-verificadoras' e 'não-auto-verificadoras'. Suponha, por exemplo, que mede duas quantidades que, depois de alguns cálculos, dão um par de valores x_i, y_i. As medidas são desenhadas num gráfico estando aproximadamente em linha recta. Seria perfeitamente razoável não verificar a aritmética para todos os pares de pontos x_i e y_i porque se cometermos algum erro ele certamente irá sobressair no gráfico—Figura 21. Este é um exemplo de cálculos auto-verificadores.

Mas suponha que terminamos uma experiência com a quantidade a calcular dada por

$$Z = \frac{14.93 \times 9.81 \times 873}{6.85 \times (0.7156)^2 \times \pi^2}. \tag{6-3}$$

O cálculo desta expressão não é auto-verificador. Não há nada que nos diga que a aritmética está correcta excepto um método qualquer de verificação.

De um modo geral, quanto mais diferente do original for o método utilizado para a verificação melhor. Suponha que tinha calculado a expressão 6-3 com uma máquina de calcular (obtendo Z=3693.28). Uma verificação seria realizar de novo os mesmos cálculos, no entanto, a probabilidade de fazer o mesmo erro uma segunda vez é muito elevada—o nosso cérebro funciona assim. Qualquer dos dois métodos seguintes é mais eficaz: 1-alterar a ordem dos números (começar pelo denominador, ou inverter a

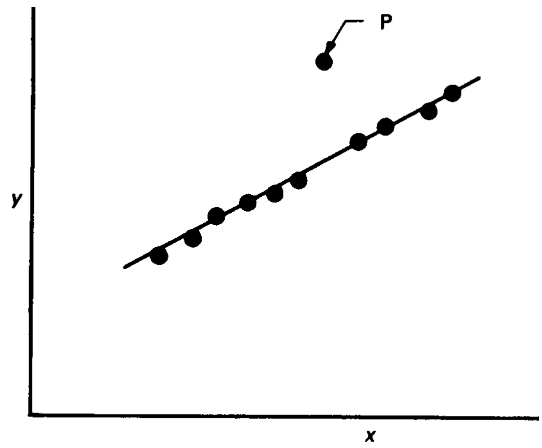


Fig. 21 - Não é preciso verificar com muito cuidado os cálculos para cada ponto, porque um erro será óbvio—P é quase certamente um erro.

ordem por que se escrevem os números, começar pelo fim), ou 2-utilizar sómente um algarismo significativo em cada número (suprimir as décimas para números maiores que 1 e usar uma décima para números menores que 1), se não se tiver cometido nenhum erro os dois resultados devem ser da mesma ordem de grandeza (Z=4157.1).

Pode pensar que é trabalho excessivo calcular o mesmo valor por dois ou três métodos diferentes, mas, não se esqueça que os erros aritméticos são uma das maiores fontes de tempo e esforço perdido em experiências. A longo prazo poupará muito esforço tendo estes cuidados adicionais nos cálculos. Não se esqueça que, enquanto que o que escreve numa aula ou num exame pode ser verificado por outra pessoa que descubra os seus erros, aquilo que fizer mais tarde por si próprio não vai ser verificado por ninguém.

Existe ainda um outro método importantíssimo de verificação que é calcular mentalmente o resultado. Com efeito todas as pessoas que trabalham com resultados experimentais devem habituar-se a fazer uma estimativa mental—com uma precisão de cerca de 1 em 3—de todos os cálculos. Assim para a expressão 6-3 pode-se pensar assim

$$\frac{14.93}{6.85} \approx 2,$$

$$2 \times 9.81 \times 873 \approx 20\,000,$$

$$(0.7156)^2 \times \pi^2 \approx \frac{1}{2} \times 10 = 5.$$

E portanto

$$Z \approx 4000. \tag{6-4}$$

Se o cálculo de verificação não coincidir com o original, re-verificar primeiro a verificação, pode ter sido, em geral, feito com menos cuidado que o original. Conta-se uma história de um estudante de pós-graduação em física teórica que levou o resultado de um cálculo elaborado ao seu supervisor, um físico famoso. O supervisor olhou para o resultado e disse 'Se considerarmos o seguinte caso especial, o seu resultado deve reduzir-se a ...' Escreveu duas linhas de cálculos nas costas de um envelope e disse 'Está a ver não dá. Deve-se ter enganado em algum sítio.' O infeliz estudante levou o seu trabalho para rever e depois de um mês de verificações voltou ao supervisor. 'Então, encontrou o erro?' 'Sim' replicou o estudante 'estava nas suas duas linhas de cálculos'.

7.4 Ordens de grandeza

Prestar atenção a todos os resultados numéricos para ver se são razoáveis. Se dividir pela constante de Planck em vez de multiplicar, deve-se notar que algo não está bem. Isto também se aplica aos cálculos com máquinas de calcular e com computadores. Não confiar cegamente nos valores que eles dão.

7.5 Cálculo dos erros

Para uma função da forma

$$Z = \frac{AB\ldots}{CD\ldots}, \tag{6-5}$$

o erro percentual em Z deve ser sempre maior que o maior erro percentual de qualquer das quantidades A, B, C, $D\ldots$ medidas, e deve sempre verificar que isso é verdade. Por outro lado, em poucos casos esse erro é muito maior do que o maior erro percentual das quantidades medidas, e também deve verificar que assim é. Para uma função da forma

$$Z = A \pm B \pm C\ldots, \tag{6-6}$$

a mesma observação é aplicada quer aos erros percentuais quer aos erros absolutos.

Nunca esquecer que raramente é necessário utilizar mais do que dois algarismos significativos no cálculo dos erros.

7.6 Dispositivos de cálculo

Podemos dispor dos seguintes dispositivos para efectuar os cálculos:

computador,
máquina de calcular,
régua de cálculo,
tabelas matemáticas
nós.

Estão indicados por ordem decrescente de custo e crescente de disponibilidade. Deve-se escolher o que for mais apropriado para o trabalho em causa.

As réguas de cálculo e tabelas matemáticas foram substituídas com vantagem pelas máquinas de calcular e computadores. Em relação a estes convém estar de sobreaviso contra a atitude de algumas pessoas que parecem seguir a máxima 'se não souber pensar, compute'. Também é necessário ter em conta que o número de casas decimais que as máquinas de calcular apresentam muitas vezes não são significativos. Se o erro de uma medida for ±0,1 não faz qualquer sentido apresentar um resultado, obtido a partir deste valor, como 2,347358543.

7.7 Verificar a álgebra

(a) As dimensões de uma expressão algébrica podem ser usadas como um meio de verificação da correcção de deduções teóricas. Não é necessário verificar a álgebra em todos os passos de uma dedução teórica, mas coisas como

$$l^2 + l,$$

em que l é um comprimento, devem saltar à vista que estão erradas.

(b) Em expressões como e^x, $\log x$, $\sin x$, $\cos x$, x deve ser adimensional. Isto é sempre verdade para qualquer função que possa ser expressa por uma série de potências de x.

(c) Deve-se verificar que uma expressão se reduz à forma correcta para casos especiais.

(d) Assegure-se que uma expressão varia no *sentido* correcto quando se varia uma das variáveis. Considere a equação de Poiseuille

$$\frac{dV}{dt} = \frac{p\pi r^4}{8l\eta}. \qquad (6\text{-}7)$$

(As quantidades envolvidas estão definidas na página 38.) Do ponto de vista físico espera-se que, se p ou r for aumentado, ou se l ou η diminuídos, então dV/dt deve aumentar. A forma da equação está de acordo com estas variações.

(e) ***Simetria.*** A simetria das situações físicas fornecem, por vezes, boas oportunidades para verificar a correcção de fórmulas. A resistência equivalente do circuito que se mostra na Figura 22 é

$$\frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}. \tag{6-8}$$

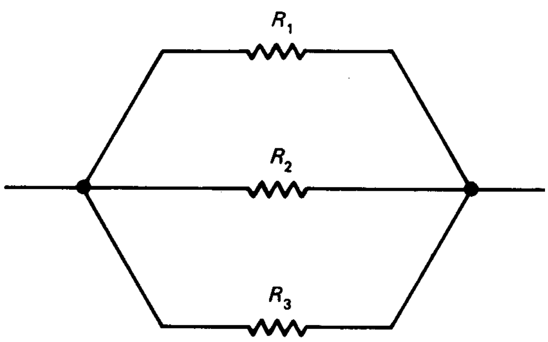


Fig. 22 - Circuito com resistências.

Se trocarmos qualquer par de resistências, por exemplo R_1 e R_2, obtemos a mesma expressão, o que está correcto, porque o circuito é simétrico relativamente às três resistências. Mas se tivessemos cometido algum erro de álgebra e obtido

$$\frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 (R_2 + R_3)}. \tag{6-9}$$

Saberíamos logo que estava errada, porque trocando R_1 e R_2 dá um resultado diferente.

(f) ***Um conselho.*** Se tiver que fazer alguma manipulação algébrica de grandezas para as quais tem valores numéricos, fazer primeiro toda a álgebra para obter o resultado final algébrico. Só substituir os valores numéricos depois de ter o resultado algébrico. É mais fácil evitar erros desta maneira, e torna a verificação mais fácil. Com efeito uma vez substituídos os símbolos por números não só o símbolo perde a sua identidade mas também se perde a possibilidade de verificar as dimensões.

8

Como Escrever um Artigo

8.1 Introdução

Uma parte muito importante do trabalho científico é a comunicação das ideias, teorias e resultados experimentais. Há uma quantidade imensa de literatura científica produzida presentemente nas mais diversas áreas e tópicos. Uma boa qualidade na escrita de comunicações científicas traz dois benefícios—o primeiro para nós próprios, os autores, quando as outras pessoas reparam no que temos para dizer, e o segundo para o resto do mundo que—por estranho que pareça—preferem que o seu material de leitura seja claro e interessante em vez de obscuro e aborrecido.

Neste capítulo iremos considerar algumas das características de bem escrever cientificamente. Para tornar a discussão mais concreta iremos restringir-nos a um artigo, ou relatório, sobre um trabalho experimental em física, mas a maior parte do que se vai dizer é válido para a escrita científica em geral.

8.2 Título

A função do título é identificar o artigo. Deve ser breve—não mais do que cerca de dez palavras. Deve-se ter presente que o título poderá aparecer num índice de assuntos. O compilador de um índice confia quase cegamente nas palavras do título para decidir onde o colocar. Assim se houver uma ou duas palavras chave que podem ajudar a classificar o trabalho, deve-se tentar colocá-las no título.

8.3 Resumo (Abstract)

Todo o artigo deve ter um resumo (em inglês—abstract) de cerca de 100 palavras, que dê informação positiva acerca do seu conteúdo.

O resumo é útil para dois tipos de leitores. Permite aos que trabalham no mesmo assunto decidir se querem ler o artigo ou não; e serve de sumário para os que só têm um interesse muito geral no assunto—podem ver os resultados essenciais sem ter que ler o artigo todo. Deste modo, o resumo deve não só indicar qual o âmbito geral do artigo, mas também deve conter os resultados numéricos finais e as principais conclusões.

8.4 Plano do artigo

A grande maioria dos artigos—a menos que sejam muito curtos—são divididos em secções. A divisão seguinte é uma das mais comuns:

- Introdução
- Técnica experimental
- Resultados
- Discussão

Alguns artigos descrevendo trabalho experimental podem também ter material teórico, que pode constituir uma secção separada, aparecendo, em geral, depois da Introdução ou dos Resultados.

Embora o plano real de um artigo dependa geralmente do seu conteúdo, o que foi apresentado acima é lógico e deve tentar segui-lo, pelo menos de um modo geral. Vames em seguida considerar cada secção em particular.

8.5 Secções de um artigo

(a) Introdução. A introdução é uma parte importante de um artigo. A maioria das experiências fazem parte de uma investigação mais geral de um problema físico. A introdução deve deixar claro

i) o interesse físico do problema,

ii) o papel que a presente experiência joga na investigação mais geral,

iii) qualquer relação entre a experiência e trabalho anterior.

Estes três pontos podem-se resumir a responder à pergunta 'Porque é que fez a experiência ou qual foi o seu *objectivo*?'

Podemos considerar que o leitor da parte principal do artigo terá um certo conhecimento do assunto, mas, outras pessoas podem não possuir esses conhecimentos. A introdução deve servir como ponto de partida para estas pessoas. Podemos não querer descrever o assunto desde o princípio, nesse caso devem-se indicar referências—não muitas—a trabalhos publicados que completem o assunto. A introdução mais esses trabalhos devem ser suficientes para levar o leitor ao ponto de perceber o resto do artigo.

Apresenta-se em seguida um exemplo de uma excelente introdução, retirada do artigo de J. J. Thomson sobre os Raios-Catódicos (Thomson 1887), anunciando a descoberta do electrão.

> CATHODE RAYS
>
> The experiments discussed in this paper were undertaken in the hope of gaining some information as to the nature of the Cathode Rays. The most diverse opinions are held as to these rays; according to the almost unanimous opinion of German physicists they are due to some process in the aether to which— inasmuch as in a uniform magnetic field their course is circular and not rectilinear—no phenomenon hitherto observed is analogous: another view of these rays is that, so far from being wholly aetherial, they are in fact wholly material, and that they mark the paths of particles of matter charged with negative electricity. It would seem at first sight that it ought not to be difficult to discriminate between views so different, yet experience shows that this is not the case, as amongst the physicists who have most deeply studied the subject can be found supporters of either theory.
>
> The electrified-particle theory has for purposes of research a great advantage over the aetherial theory, since it is definite and its consequences can be predicted; with the aetherial theory it is impossible to predict what will happen under any given circumstances, as on this theory we are dealing with hitherto unobserved phenomena in the aether, of whose laws we are ignorant.
>
> The following experiments were made to test some of the consequences of the electrified-particle theory.

Iremos referir esta passagem mais tarde, mas entretanto, note-se como Thomson deu clara e directamente o tipo de informação que deve aparecer na introdução—a frase de abertura é um modelo de perfeição.

(b) A técnica experimental. Nesta secção deve-se descrever a aparelhagem. A quantidade de detalhe a fornecer varia bastante devendo basear-se no seu próprio bom senso, no entanto, alguns conselhos gerais podem ser úteis como guia. Se a aparelhagem utilizada for de um tipo vulgar, não é necessário descrevê-la, bastando uma referência para que qualquer pessoa interessada possa encontrar uma descrição detalhada noutro sítio. Por outro lado, se houver pormenores inovadores, devem ser descritos com algum detalhe.

Embora se possa considerar que, o leitor desta secção esteja familiarizado com as técnicas utilizadas não se deve destinar o artigo a outros investigadores que trabalhem na mesma área. Não se deve utilizar frases exotéricas só compreendidas por esses investigadores, nem se devem incluir detalhes pormenorizados que só a eles interessariam.

(c) Resultados. De um modo geral nunca é possível, nem desejável, apresentar todas as medidas realizadas pois só iriam confundir e distrair o leitor do verdadeiro objectivo do trabalho e iriam obrigá-lo a gastar tempo a descobrir a importância relativa de cada medida de modo a extrair os resultados essenciais. Mas isso faz parte do nosso trabalho ao escrever o artigo. Deve, portanto, apresentar

i) Uma amostragem significativa de algumas das medidas básicas,

ii) os resultados mais importantes.

Note-se bem a palavra *representativos* em (i). A amostragem que apresentar no artigo deve dar uma ideia fiel da qualidade, precisão e reprodutibilidade das medidas. Assim, se dispuser de 100 conjuntos de medidas, não vai reproduzir o segundo melhor com a indicação de 'Resultados típicos'.

(d) Discussão. O título fala por si próprio. Tal como na Introdução, esta secção é uma das mais importantes do artigo. Deve incluir

i) comparação com outras medidas semelhantes, se existirem,

ii) comparação com a teoria relevante,

iii) discussão do estado do problema investigado à luz dos resultados obtidos. Esta é a *conclusão*, a contraparte ao *objectivo* da experiência referido na Introdução.

8.6 Diagramas, gráficos e tabelas

Quase tudo o que se disse nos Capítulos 5 e 6 acerca de diagramas, gráficos e tabelas, se aplica ao seu uso em artigos.

Um diagrama pode dar uma grande ajuda na compreensão de um texto. A menos que a aparelhagem seja muito vulgar, um diagrama desta deve, quase sempre, ser incluído. Os gráficos são muito convenientes e práticos para mostrar os resultados. Devem ser tão simples quanto possível, tal como os diagramas. Na versão final impressa os gráficos e diagramas são geralmente reduzidos 2 a 3 vezes relativamente aos originais, por isso, a menos que as linhas e texto estejam grossos no original, a versão final pode parecer leve e pouco distinguível.

Outra maneira prática de apresentar os resultados são as tabelas. Têm a grande vantagem de sobressair do texto e o leitor pode encontrar resultados fácilmente. No entanto não se deve exagerar no número de tabelas para evitar a pesquisa fastidiosa dos resultados importantes.

8.7 Instruções para os autores

Muitas revistas científicas publicam, na própria revista ou num panfleto separado, instruções para os autores, de maneira a que os artigos nelas publicados apresentem um mesmo estilo gráfico. É aconselhável ler estas instruções *antes* de escrever o artigo na sua forma final para evitar trabalho adicional mais tarde. Estas instruções referem-se, em geral, ao formato dos títulos das secções, às abreviaturas, referências, notas de rodapé, tabelas, diagramas e gráficos. Algumas revistas já aceitam o texto em formatos electrónicos ($\TeX$, processadores de texto específicos ou outros).

8.8 Clareza

A clareza é uma qualidade essencial na escrita científica. Podemos distinguir dois tipos.

(a) Clareza estrutural. Um texto possui clareza estrutural se o leitor pode seguir com facilidade o delinear da argumentação—ver a ideia geral apesar dos pormenores. Tópicos semelhantes devem ser agrupados, e estes grupos colocados numa ordem lógica.

É fortemente aconselhado escrever um esquema geral antes de começar a escrever o artigo. Trata-se de um diagrama esquemático em que todas as ideias, argumentos, detalhes experimentais, etc. estejam representados por uma palavra ou frase curta. Quando se faz este esquema, o conjunto é vista de uma forma mais clara e abrangente, e, além disso, é mais fácil modificá-lo se não estivermos satisfeitos com o que temos. As secções principais devem corresponder ao plano apresentado na secção 8.4.

(a) Clareza de exposição. O outro tipo de clareza, que se pode designar por clareza de exposição, consiste em fazer o leitor entender exactamente aquilo que estamos a tentar comunicar-lhe em cada passo da exposição.

Consideremos novamente o extracto do artigo sobre os Raios Catódicos de Thomson. É de uma clareza cristalina. Somos levados de um ponto para o seguinte. Notar a frase 'so far from beeing wholly aethereal'. Mesmo que tivesse sido omitida ainda podíamos seguir a discussão, mas o contraste explícito é útil. Facilitar as coisas ao leitor é vantajoso em qualquer tipo de escrita, mas particularmente na escrita científica.

Pode-se pensar que o exemplo dado não é um teste muito rigoroso para o escritor, porque ele está a explicar um assunto simples. Isso é verdade, mas, o motivo porque é simples é porque Thomson o fez simples. Ele *seleccionou* as características importantes das teorias sobre a natureza desses raios. Ele consegue fazê-lo porque ele *compreende a física* do fenómeno. Este é um ponto fundamental. Clareza na escrita depende de clareza no nosso raciocínio. Não se consegue produzir um artigo claro e lógico a menos que se compreenda a física envolvida.

8.9 Conclusão

Nem toda a gente consegue escrever boa literatura, mas toda a gente pode escrever Português (Inglês, Francês, etc.) bom e claro—se estiver disposto a dar-se a esse trabalho. Temos que ser críticos acerca do que escrevemos. Devemos perguntar-nos constantemente se o que estamos a escrever tem lógica, é claro e conciso. Caso contrário deve-se tentar novamente—e novamente… Escrever difícil torna a leitura fácil. Deve-se pedir a opinião de outros acerca do que escrevemos.

Não se deve considerar boa experimentação e boa escrita como coisas independentes. Ambos apresentam os seus aspectos belos, e, não é por acaso que, grandes cientistas como Galileu ou Newton, tenham produzido alguma da melhor literatura científica. Mas vamos dar a última palavra a um não-cientista—Cervantes.

'Estude para aclarar os seus Pensamentos sob a Luz mais pura, trabalhando tanto quanto possível para não os deixar escuros nem intricados, mas claros e inteligíveis.'

APÊNDICES

A

Unidades SI

O sistema de unidades utilizado neste livro é o Sistema SI. SI é uma abreviatura de Système International d'Unités. Trata-se de um sistema completo e lógico com o fim de ser utilizado em todos os ramos da ciência e tecnologia. Foi aprovado formalmente em 1960 pela Conferência Geral de Pesos e Medidas, que é a organização internacional responsável pela manutenção dos padrões de medida. A utilização deste sistema está cada vez mais generalizado em todo o mundo. À parte os seus méritos intrínsecos, tem a vantagem de, com *um* só sistema, cobrir-se todas as situações—teóricas e práticas. Deste modo todos os que utilizem este sistema poupam o esforço mental necessário para mudar de unidades de um sistema para outro.

A seguir resumem-se as principais características do sistema SI:

1. O sistema SI é um sistema métrico. Há seis unidades fundamentais (ver a seguir).

2. As unidades derivadas estão directamente relacionadas com as unidades fundamentais. Por exemplo a unidade de aceleração é $1\,\mathrm{m\,s^{-2}}$. A unidade de força é o newton (N), que é a força necessária para imprimir a um corpo de 1 kg uma aceleração de $1\,\mathrm{m\,s^{-2}}$. A unidade de energia é o joule, que é o trabalho realizado quando uma força de 1 N faz deslocar um corpo de uma distância de 1 m.

A utilização de unidades auxiliares é fortemente desencorajada. Deste modo a unidade de pressão é $1\,\mathrm{N\,m^{-2}}$; não se deve utilizar a atmosfera ou o torr. Do mesmo modo não se deve utilizar a caloria; todas as formas de energia devem ser expressas em joules.

3. As unidades eléctricas foram racionalizadas sendo obtidas por atribuição do valor $4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{H\,m^{-1}}$ a μ_0, a permeabilidade do vazio. Deste modo o

ampere—uma das seis unidades fundamentais—é a unidade de corrente. As outras unidades eléctricas são deduzidas directamente das unidades fundamentais e são idênticas às unidades práticas.

4. O uso de múltiplos e fracções de unidades é, normalmente, restrito a potências de 1000. Portanto numa perspectiva rígida o cm não deveria ser utilizado. Por outro lado a passagem de 1 mm^3 para 1 m^3 é tão grande que se mantém o litro (= 10^{-3} m^3) como unidade de volume conveniente.

A.1 Unidades SI—nomes e símbolos

Tabela 7: Unidades SI—nomes e símbolos

Quantidade	*Unidade*	*Símbolo*	*Relação com outras unidades*
unidades fundamentais			
comprimento	metro	m	
massa	quilograma	kg	
tempo	segundo	s	
corrente eléctrica	ampere	A	
temperatura termodinâmica	grau kelvin	K	
intensidade luminosa	candela	cd	
Unidades suplementares			
ângulo plano	radiano	rad	
ângulo sólido	steradiano	sr	
unidades derivadas com nomes especiais			
força	newton	N	$kg\,m\,s^{-2}$
energia	joule	J	$N\,m$
potência	watt	W	$J\,s^{-1}$
carga eléctrica	coulomb	C	$A\,s$
potencial eléctrico	volt	V	$J\,C^{-1}$
resistência eléctrica	ohm	Ω	$V\,A^{-1}$
capacidade eléctrica	farad	F	$C\,V^{-1} = s\,\Omega^{-1}$
fluxo magnético	weber	Wb	$V\,s$
densidade de fluxo magnético	tesla	T	$Wb\,m^{-2}$
indutância	henry	H	$V\,s\,A^{-1} = \Omega\,s$
frequência	hertz	Hz	s^{-1}
temperatura	grau Celsius	°C	$t[°C] = T[K] - 273.15$
fluxo luminoso	lumen	lm	cd sr
iluminação	lux	lx	$lm\,m^{-2}$

Tabela 8: Fracções e múltiplos decimais

fracção	*prefixo*	*símbolo*	*múltiplo*	*prefixo*	*símbolo*
10^{-3}	mili	m	10^{3}	kilo	k
10^{-6}	micro	μ	10^{6}	mega	M
10^{-9}	nano	n	10^{9}	giga	G
10^{-12}	pico	p	10^{12}	tera	T
10^{-15}	femto	f	10^{15}	peta	P
10^{-18}	atto	a	10^{18}	exa	E

Nota: Deve-se juntar o prefixo à unidade *antes* de aplicar o símbolo de potência, por exemplo

$$1\,\mu\mathrm{m}^2 = 1\,(\mu\mathrm{m})^2 = 10^{-12}\,\mathrm{m}^2.$$

A.2 Definição das unidades fundamentais SI

Metro

O *metro* é o comprimento igual a 1 650 763.73 comprimentos de onda no vazio da radiação correspondente à transição entre os níveis $2p_{10}$ e $5d_5$ do átomo de crípton-88.

Quilograma

O *quilograma* é igual à massa do quilograma protótipo internacional (em platina iridiada) que se mantém no Bureau International des Poids et Mesures em Sèvres, França.

Segundo

O *segundo* é o intervalo de tempo ocupado por 9 192 631 770 ciclos da radiação correspondente à transição entre os níveis $F = 4$, $m_F = 0$ e $F = 3$, $m_F = 0$ do estado fundamental do átomo de césio-133, não perturbado por nenhum campo externo.

Ampere

O *ampere* é a corrente constante que, ao passar em dois condutores paralelos de comprimento infinito e secção circular desprezável colocados a uma distância de 1 metro no vazio, dá origem a uma força entre eles com o valor de 2×10^{-7} newton por metro de comprimento.

Temperatura termodinâmica

O *grau Kelvin* é definido atribuindo-se o valor de 273.15 à temperatura termodinâmica do ponto triplo da água.

Intensidade luminosa

O valor da *candela* é tal que a luminância de um corpo negro à temperatura de solidificação da platina (2042K) é 0.6 candela por milímetro quadrado.

Para mais informação ver, por exemplo, Cohen 1986.

A.3 Unidades vulgares

Units	*Metric Equivalent*	*US Equivalent*
acre	0.404 685 64 hectares	43,560 feet^2
acre	4,046,856 4 meters^2	4,840 yards^2
acre	0.004 046 856 4 kilometres^2	0.001 562 5 miles^2, statute
are	100 meters^2	119.599 yards^2
barrel		
(petroleum, US)	158.987 29 litres	42 gallons
(proof spirits, US)	151.416 47 litres	40 gallons
(beer, US)	117.347 77 litres	31 gallons
bushel	35.239 07 litres	4 pecks
cable	219.456 meters	120 fathoms
chain (surveyor's)	20.116 8 meters	66 feet
cord (wood)	3.624 556 meters^3	128 feet^3
cup	0.236 588 2 litres	8 ounces, liquid (US)
dram, avdp.	1.771 845 2 grams	0.0625 5 ounces, avdp.
dram, troy	3.887 934 6 grams	0.125 ounces, troy
dram, liquid (US)	3.696 69 millilitres	0.125 ounces, liquid
fathom	1.828 8 meters	6 feet
foot	30.48 centimetres	12 inches
foot	0.304 8 meters	0.333 333 3 yards
foot	0.000 304 8 kilometres	0.000 189 39 miles, statute
foot^2	929.030 4 centimetres^2	144 inches^2
foot^2	0.092 903 04 meters^2	0.111 111 1 yards^2
foot^3	28.316 846 592 litres	7.480 519 gallons
foot^3	0.028 316 847 meters^3	1,728 inches^3
furlong	201.168 meters	220 yards
gallon, liquid (US)	3.785 411 784 litres	4 quarts, liquid
gill (US)	118.294 118 millilitres	4 ounces, liquid
grain	64.798 91 milligrams	0.002 285 71 ounces, advp.
gram	1,000 milligrams	0.035 273 96 ounces, advp.
hand (height of horse)	10.16 centimetres	4 inches

Units	*Metric Equivalent*	*US Equivalent*
hectare	10,000 meters^2	2.471 053 8 acres
hundredweight, long	50.802 345 kilograms	112 pounds, avdp.
hundredweight, short	45.359 237 kilograms	100 pounds, avdp.
inch	2.54 centimetres	0.083 333 33 feet
inch	72.27 point	6.0225 pica
inch^2	6.451 6 centimetres^2	0.006 944 44 feet^2
inch^3	16.387 064 centimetres^3	0.000 578 7 feet^3
inch^3	16.387 064 millilitres	0.029 761 6 pints, dry
inch^3	16.387 064 millilitres	0.034 632 0 pints, liquid
kilogram	0.001 tons, metric	2.204 623 pounds, avdp.
kilometre	1,000 meters	0.621 371 19 miles, statute
kilometre^2	100 hectares	247.105 38 acres
kilometre^2	1,000,000 meters^2	0.386 102 16 miles^2,
statute knot (1 nautical mi/hr)	1.852 kilometres/hour	1.151 statute miles/hour
league, nautical	5.559 552 kilometres	3 miles, nautical
league, statute	4.828.032 kilometres	3 miles, statute
link (surveyor’s)	20.116 8 centimetres	7.92 inches
later	0.001 meters^3	61.023 74 inches^3
later	0.1 decalitre	0.908 083 quarts, dry
later	1,000 millilitres	1.056 688 quarts, liquid
meter	100 centimetres	1.093 613 yards
meter^2	10,000 centimetres^2	1.195 990 yards^2
meter^3	1,000 litres	1.307 951 yards^3
micron	0.000 001 meter	0.000 039 4 inches
mil	0.025 4 millimetres	0.001 inch
mile, nautical	1.852 kilometres	1.150 779 4 miles, statute
mile^2, nautical	3.429 904 kilometres^2	1.325 miles^2, statute
mile, statute	1.609 344 kilometres	5,280 feet or 8 furlongs
mile^2, statute	258.998 811 hectares	640 acres or 1 section
mile^2, statute	2.589 988 11	
kilometres^2	0.755 miles^2, nautical	
minim (US)	0.061 611 52 millilitres	0.002 083 33 ounces, liquid or one-sixtieth of a dram
ounce, avdp.	28.349 523 125 grams	437.5 grains
ounce, liquid (US)	29.573 53 millilitres	0.062 5 pints, liquid
ounce, troy	31.103 476 8 grams	480 grains
pace	76.2 centimetres	30 inches
peck	8.809 767 5 litres	8 quarts, dry

Units	*Metric Equivalent*	*US Equivalent*
pennyweight	1.555 173 84 grams	24 grains
pint, dry (US)	0.550 610 47 litres	0.5 quarts, dry
pint, liquid (US)	0.473 176 473 litres	0.5 quarts, liquid
point (typographical)	0.351 459 8 millimetres	0.013 837 inches
pound, avdp	453.592 37 grams	16 ounces, avdp
pound, troy	373.241 721 6 grams	12 ounces, troy
quart, dry (US)	1.101 221 litres	2 pints, dry
quart, liquid (US)	0.946 352 946 litres	2 pints, liquid
quintal	100 kilograms	220.462 26 pounds, avdp.
rod	5.029 2 meters	5.5 yards
scruple	1.295 978 2 grams	20 grains
section (US)	2.589 988 1 kilometres^2	1 mile^2, statute or 640 acres
span	22.86 centimetres	9 inches
stere	1 meter^3	1.307 95 yards^3
tablespoon	14.786 76 millilitres	3 teaspoons
teaspoon	4.928 922 millilitres	0.333 333 tablespoons
ton, long or deadweight	1,016.046 909 kilograms	2,240 pounds, avdp.
ton, metric	1,000 kilograms	2,204.623 pounds, avdp.
ton, metric	1,000 kilograms	32,150.75 ounces, troy
ton, register	2.831 684 7 meters^3	100 feet^3
ton, short	907.184 74 kilograms	2,000 pounds, avdp.
township (US)	93.239 572 kilometres^2	36 miles^2, statute
yard	0.914 4 meters	3 feet
yard^2	0.836 127 36 meters^2	9 feet^2
yard^3	0.764 554 86 meters^3	27 feet^3
yard^3	764.554 857 984 litres	201.974 gallons
ponto (point, pt)	1/72.27 inch	1/12 pica
pica (pc)	12 point	12/72.27 inch
big point, bp	1/72 inch	
ponto didot (dd)	1238/1157 point	
cicero (cc)	12 didot	

B

Grandezas, Números, Unidades

*Artigo extraído de *Gazeta de Física*, Vol (199?)

DIETMAR APPELT
Laboratório de Física, Faculdade de Ciências,
Universidade do Porto

Face a um progressivo e crescente hábito de expressão indevida, recordam-se as regras válidas em Portugal, e na maioria de outros países, para a forma acordada e oficial de expressão escrita de grandezas, números e unidades. Sendo assunto de interesse básico nas Ciências Físicas, é igualmente extensivo à generalidade das Ciências da Natureza, Ciências Económicas e todos os domínios em que as referidas entidades encontrem utilização.

B.1 Introdução

Tem-se vindo a acentuar cada vez mais a tendência para transpor para a forma de expressão nacional—no caso vertente, a língua portuguesa, seus acrónimos e formas genéricas sincopadas—termos e expressões retomadas «tal qual» da língua utilizada nas publicações em que os novos conceitos fazem as suas primeiras aparições: actualmente a língua inglesa é indubitavelmente o manancial de quase toda a informação inovadora. Na língua portuguesa, este fenómeno de absorção imediatista tem provavelmente tido uma extensão consideravelmente mais ampla do que nas outras grandes línguas do mundo ocidental. O idioma oficioso do Brasil tem, sem dúvida, exercido uma forte influência (quanto a nós, muitas vezes deplorável) neste sentido.

Para além deste fenómeno, talvez por arrastamento, têm-se vindo a introduzir em Portugal, no domínio das Ciências Físicas e outras que têm de recorrer a números e grandezas mais ou menos objectivas, «maus hábitos» quanto à forma de expressão das grandezas e dos seus valores, isto é, dos números e das unidades. Esta «epidemia» tem-se vindo a alastrar desde alunos dos mais variados graus e estados de ensino até professores, políticos, jornalistas e *opinion makers* (naturalmente que somos estatisticamente semelhantes à sociedade que regularmente integramos, pelo que, por vezes, somos levados pela mesma corrente...).

Até mesmo as tão famosas Provas Especificas, essa instituição oficial de elevado impacto nacional para alunos, pais, professores e governantes—e, como tal, de alta responsabilidade—têm, nos últimos anos (também em 1995), sido afectadas desta enfermidade.

Defrontando-nos quase diariamente (quiçá *quixotescamente)* com a situação de corrigir os maus hábitos que alunos universitários trazem de trás e de, delicadamente, fazermos «menções honrosas» a colegas—para além dos *frissons* que experimentamos nas mais diversas situações de ambientes de avançado nível tecnológico (por vezes até científico), como por exemplo, a bordo das aeronaves de companhias aéreas portuguesas, onde ouvimos que a temperatura é de ... graus **centígrados—**pareceu-nos que seria útil recordar o que sobre este assunto está instituído em Portugal, em muitas situações mesmo disposto por via legal. Sem prejuízo de uma ou outra referência a outros domínios, limitar-nos-emos, nesta exposição, à aplicação dos princípios ao campo das Ciências Físicas.

B.2 Grandezas

Nas expressões analíticas, as grandezas são representadas por símbolos literais. Não havendo regras especificas divergentes em Portugal, deverão, em principio, ser aqui seguidos os preceitos preconizados na norma ISO 31[*] Trata-se de um trabalho volumoso—para além de uma parte introdutória, esta norma é constituída por mais 13 partes, correspondentes aos diversos domínios específicos da Física, assim como uma parte dedicada aos sinais e símbolos matemáticos—em que estão estabelecidos os símbolos a utilizar para a esmagadora maioria das grandezas usadas em Física e Química, assim como para funções da Matemática. Dada a sua extensão e abrangência, não vamos naturalmente reproduzi-lo aqui. A sua introdução mais formal no acervo normativo português está em estudo há já algum tempo.

---

[*] ISO é a sigla de *International Organization for Standardization/Organisation internationale de normalisation*, entidade que Portugal integra, e como tal está obrigado a respeitar o preceituado.

Parece-nos, no entanto, útil recordar aqui alguns princípios básicos sobre a forma de representar as grandezas (ISO 31-0 [1]):

Os **símbolos das grandezas** são geralmente constituídos por apenas uma letra do alfabeto latino ou grego, por vezes acrescida de índices ou outros sinais modificadores. Estes símbolos são impressos em *caracteres itálicos (inclinados).*

O símbolo não é seguido de qualquer ponto, salvo nos casos normais de pontuação (p. ex. no fim de uma frase). Os símbolos consagrados para as grandezas são dados nas várias partes daquela norma: ISO 31-1 a ISO 31-10, ISO 31-12 e ISO 31-13 [2]. Assim, enquanto o potencial eléctrico do campo electrostático deve preferencialmente ser representado por V (φ é também admitido), a forma preferencial para representar uma diferença de potencial (ou tensão) eléctrica deve ser U (embora V seja também aceite); a força electromotriz deve ser representada por E, tal como genericamente a energia; às grandezas comprimento, largura e altura correspondem, respectivamente, os símbolos l (ou L), b e h; para o raio de curvatura está consagrado o símbolo ρ, o mesmo que para a massa volúmica, a carga (eléctrica) volúmica e a resistividade (eléctrica). O símbolo v é utilizado para representar quer a grandeza velocidade, quer o volume mássico (inverso da massa volúmica), enquanto V representa o volume. O símbolo T pode representar o período de um fenómeno periódico ou a temperatura termodinâmica. O factor de potência (em corrente eléctrica alternada sinusoidal) deve ser representado por λ (sendo que é válida a expressão analítica $\lambda = \cos\varphi$). Estes são apenas alguns exemplos retirados ao acaso da vasta listagem contida naquele grupo de normas.

Excepcionalmente empregam-se símbolos constituídos por duas letras, para combinações de grandezas de dimensão um (p. ex., o número de Reynolds, *Re).*

Quando, num dado contexto, diferentes grandezas têm o mesmo símbolo literal ou quando haja interesse em distinguir diferentes aplicações ou diferentes tipos de valores (p. ex. valor médio, valor eficaz, etc.) para a mesma grandeza física, pode-se recorrer ao uso de índices inferiores para fazer a distinção. Nesta situação, são recomendados os princípios seguintes: o índice que representa o símbolo de uma grandeza física é impresso em caracteres itálicos (inclinados); os outros índices são impressos em caracteres romanos (direitos); os números utilizados como índices serão impressos em caracteres romanos (direitos), mas os símbolos literais que representam números serão, em geral, impressos em caracteres itálicos (inclinados). Nesta conformidade C_g representa a capacidade térmica de um gás enquanto a capacidade térmica a pressão constante deverá ser representada por C_p; o símbolo representativo da aceleração da gravidade normal será g_n, enquanto g_{jk} é o símbolo adequado para representar a entalpia livre mássica afectada de dois índices correntes; E_k será o símbolo próprio para representar a energia cinética enquanto a energia da partícula de ordem k (índice numérico corrente) será representada por E_k

B.3 Números

Neste domínio constata-se que, com frequência assustadoramente crescente, se utiliza um sinal gráfico não-conforme para separar a parte inteira da parte decimal, quer na linguagem escrita quer na linguagem falada. Com efeito, a Norma Portuguesa NP-9 [3] estabelece claramente que os sinais gráficos a utilizar para aquela finalidade *são o ponto e a vírgula, sendo o primeiro empregado nos países de língua inglesa e o segundo nos restantes* (sic). Não tem, pois, cabimento utilizar o «ponto».

Transcrevemos aqui a parte relevante da nota de rodapé daquela norma: *«Esta norma foi mandada adoptar obrigatoriamente no ensino e nos livros didácticos pela Portaria n.° 17053 de 4/3/1959 do Ministério da Educação Nacional».* Muito embora aquela norma continue válida à data da redacção deste apontamento, aparentemente o seu preceituado esvaiu-se dos hábitos...

Para além disso, estabelece-se ai que se deverá utilizar um espaço em branco para separar os grupos de três algarismos (contados para um e outro lado da vírgula), destinados a facilitar a leitura do número.

Também a nomenclatura dos grandes números está há muito claramente estabelecida para Portugal na norma NP-18 [4]: utiliza-se a chamada regra N, 10^{6N} = (N)ilião. Por ordem crescente de sucessivas potências de 10^3, os números são designados por: milhar (mil), milhão, milhar de milhões (mil milhões), bilião, milhar de biliões (mil biliões), trilião, milhar de triliões (mil triliões), quadril, etc. Também esta norma se apresenta com uma nota de rodapé idêntica à transcrita acima.

Um bilião é, pois, 10^{12} = 1 000 000 000 000 e não 10^9 = 1 000 000 000 como frequentemente é empregue.

B.4 Unidades

Este é, possivelmente, o capítulo em que surge maior variedade e abundância de não-conformidades.

Este assunto está coerentemente tratado em vários documentos regulamentadores: a nível internacional na norma ISO 1000 [5], a nível nacional na Norma Portuguesa NP-172 [6] e, mais recentemente, no Decreto Lei 238/94 [7].

As unidades têm nomes e símbolos (únicos, conforme consignados naqueles documentos), que são entidades distintas mas muitas vezes confundidas.

Os **nomes** das unidades são substantivos comuns [8] e, como tal, na língua portuguesa, deverão ser escritos com letra minúscula (exceptuam-se, naturalmente, as situações em que quaisquer substantivos comuns podem ou devem ser grafados de outra forma, p. ex. no inicio de uma frase) e formam plural—podendo, eventualmente, ser invariáveis nesta forma (note-se que a aplicação do plural apenas tem lugar para duas ou mais entidades). Teremos, então, uma corrente eléctrica de intensidade três amperes (mas não ampere, nem ampères), uma potência de cinco watts* (e não watt, nem vátios), tal como uma massa de cinco quilogramas (mas não quilos, nem quilogramas) ou um comprimento de sete metros, uma frequência de cento e cinco megahertz, uma condutância de dezassete milisiemens, uma temperatura de vinte e três graus celsius (mas não centígrados!).

Temos plena consciência da controvérsia desta matéria. Há, com efeito, Escolas Superiores de Tecnologia e/ou Ciências da Natureza, onde está divulgada prática contrária: a tensão eléctrica em nossas casas seria de duzentos e vinte volt, o termoacumulador drena uma corrente de sete **ampere**, mas o comprimento da sala é de cinco **metros**, a capacidade do mesmo termoacumulador é de cem **litros**† etc. A inconsistência está bem patente; não vemos racionalidade nesta prática, pelo que não a apoiamos.

Lamentavelmente, ainda está demasiado vulgarizado o mau hábito de se utilizarem unidades fora do SI, e algumas fora de uso há muito tempo. A grandeza pressão é, possivelmente, uma das que tem tido os mais variados e dispersos maus tratos em termos de unidades: exprimem-se—tanto na linguagem falada como, pior ainda, na linguagem escrita—pressões em atmosferas, quilos, toneladas, quilos por milímetro quadrado, e outras antiguidades. Também as unidades magnéticas têm sido bastante mal tratadas (especialmente a nível universitário): induções magnéticas expressas em gauss, intensidades de campo em oersted, fluxos em maxwell,... coisas daqueles tempos em que os condensadores se adquiriam a metro (a unidade de capacidade—CGS‡—era o centímetro!). Assim como há, por vezes, ainda a preocupação de ensinar a alunos universitários—depois de isso lhes ter sido proscrito a nível secundário—a exprimir as forças em quilos e dines, viscosidades em poises e stokes, energias em ergs, calorias, Calorias (esta nuance é só para gente suficientemente perspicaz) e kilocalorias, potências em cavalos-vapor), etc., etc.

A utilização dos **símbolos** das unidades obedece a uma série de regras, nem sempre respeitadas, e que por isso resumimos a seguir.

---

* As letras «k» (capa), «w» (duplo vê) e «y» (i grego) já integram regularmente o alfabeto português.

† A este propósito, recordamos que para esta unidade se admite, de momento, qualquer um dos dois símbolos l ou L.

‡ CGS é a designação de um sistema de unidades utilizado no passado, que tinha por unidades de base o centímetro, o grama e o segundo.

Os **símbolos das unidades** (normalizados a nível internacional, isto é, iguais em todas as línguas, mesmo naquelas que usam caracteres diferentes dos latinos, tais como o grego, russo, japonês, etc.) são impressos em caracteres romanos (direitos); são representados por uma ou duas letras, habitualmente minúsculas, excepto quando os nomes correspondentes são derivados de nomes próprios (em geral de físicos), caso em que a letra inicial é maiúscula; ficam invariáveis no plural; não são seguidos de qualquer ponto (excepto no fim de uma frase); devem ser usados apenas a seguir ao valor numérico de uma grandeza expresso em caracteres numéricos (12 V, mas não doze V), do qual deverão estar separados por um espaço.

Os valores numéricos das grandezas com dimensões deverão ser sempre seguidos da respectiva unidade, em geral representada pelo seu símbolo:

5,3 m ± 0,1 m   e não   5,3 ± 0,1 m;

2,3m x l,6 m x 3, 1m   e não   2,3 x l,6 x 3,1 m;
e muito menos   2,3 x 1,6 x 3,1 m^3.

Também   23°C ± 2°C   ou   (23 + 2)°C,
de preferência até   23°C ± 2 K;
mas nunca   23 ± 2°C

Note-se que, quando se exprimem tolerâncias estreitas ou precisões elevadas, o valor principal e o valor indicativo da tolerância/precisão poderão ter ordens de grandeza suficientemente afastadas para justificar a sua expressão em unidades diferentes (com a vantagem de uma leitura imediata permitir, desde logo, uma apreciação mais significativa das respectivas incertezas): por exemplo, 8,3 m ± 5 mm ou 42,7 mm ± 2 μm.

B.5 Funções matemáticas

Também aqui há alguns hábitos antigos que têm de ser revistos e adaptados à realidade actualmente instituída [9]. Referiremos apenas as situações mais correntes, em relação às quais são frequentes as não-conformidades. Assim:

O sinal a utilizar para exprimir a igualdade aproximada de duas quantidades é «≈» e não «~», que significa «proporcional a», tal como o símbolo «∝»; a função correspondência é representada pelo símbolo «=^».

Para a função logaritmo há, para além de um símbolo genérico—$\log_a x$, que representa o logaritmo de base *a* de x—três símbolos específicos: ln x (logaritmo natural [neperiano] de x), lg x (logaritmo decimal de x) e lb x (logaritmo binário de x).

As funções trigonométricas (circulares) directas são, todas elas, representadas por um símbolo constituído por três letras: sin x (a forma sen x não está prevista), cos x, tan x (embora tg x seja ainda utilizado), cot x (e não cotg x) sec x, csc x (cosec x é também admitido). As correspondentes funções inversas são representadas pelos respectivos símbolos precedidos do prefixo simbólico «ar»: arsin x, arcos x, artan x, arcot x, arsec x, arcsc x. A coerência está bem patente. Filosofia semelhante está subjacente aos símbolos normalizados para as funções hiperbólicas: sinh x, cosh x, tanh x, coth x, sech x, csch x, arsinh x, arcosh x, artanh x, arcoth x, arsech x, arcsch x.

As grandezas vectoriais devem ser representadas por um símbolo em tipo negrito, ***a***, (habitualmente utilizado na escrita impressa) ou tipo normal encabeçado por uma flecha, $\vec{a}$ (mais cómodo para a escrita manual)—sempre em itálico, já que de símbolos de grandezas se trata. O módulo do vector a é representado simplesmente por a ou $|\boldsymbol{a}|$ (ou $|\vec{a}|$). O vector unitário da mesma direcção e sentido de **a** é representado por $\mathbf{e}_a$. As **coordenadas** cartesianas do vector ***a*** são representadas por a_x, a_y, a_z, ou, genericamente, por a_j. Os versores de um sistema ortonormal são representados por $\boldsymbol{e}_x$, $\boldsymbol{e}_y$, $\boldsymbol{e}_z$ (genericamente, ej) ou i, j, k. Pelo que as **componentes** do vector **a** (que são vectores) deverão ser representadas por $a_x e_x$, $a_y e_y$, $a_z e_z$. Em conformidade, as coordenadas cartesianas de um raio vector são iguais às coordenadas cartesianas do ponto designado pelo raio vector. Tratando-se de vectores representativos de grandezas físicas, os seus **valores** deverão ser representados em conformidade com o modo de representação utilizado para as grandezas escalares: a seguir a cada valor numérico deverá ser escrito o símbolo da unidade; pode-se simplificar, escrevendo apenas uma vez o símbolo da unidade, desde que se tomem as mesmas precauções anteriormente indicadas para as grandezas escalares (ver a parte final do § 4):

$$\boldsymbol{F} = (3\ \mathrm{N}, -2\ \mathrm{N}, 5\ \mathrm{N}) = (3, -2, 5)\ \mathrm{N}$$

B.6 Conclusão

Limitámo-nos a recordar algumas regras que, em principio, são do conhecimento de todas as pessoas que lidam com as Ciências da Natureza, cientistas, professores, alunos, engenheiros, técnicos e outros. Não fomos nós que estabelecemos essas regras, nem as impomos; apenas nos empenhamos no seu seguimento—tal como conduzimos o nosso automóvel pelo lado direito da via, etc.

Procuremos, pois, usar apenas unidades SI e aquelas que, não sendo SI, são no entanto de uso autorizado pelo CIPM* [5, 6] e pela legislação em vigor [7]. Deixemos para trás as forças de três quilos (ou 3 Kg) assim como as pressões de 5 toneladas, os volts eficazes e os amperes inductivos. Mas usemos o SI na sua plena extensão, isto é, façamos uso regular dos seus múltiplos e submúltiplos—o comprimento de onda da radiação emitida por um laser de He-Ne deverá ser preferencialmente expresso por 632,8 nm em lugar de 6,328 x 10^{-7} m (mas nunca por 6328 Å), da mesma forma que exprimimos a distancia de Porto a Coimbra por 112 km e não por 112 x 103 m e muito menos por 112 000 m; e inserimos num circuito electrónico um condensador de 0,47 µF ou uma resistência de 82 kΩ (mas não de 82 K). Sem dúvida que a escola e muito especialmente as ESCOLAS—sejam de que nível forem—e respectivos DOCENTES têm aqui um papel fundamental, que talvez nem sempre tenham desempenhado devidamente.

A nossa intervenção pretende apenas ser uma chamada de atenção para o que está oficialmente instituído e publicado. Por isso não retomámos aqui todos os preceitos legais. Mas deixamos as referências documentais mais importantes para que possam ser cotejadas por aqueles que desejarem estar actualizados.

Permitimo-nos, no entanto, advertir que a legislação portuguesa actualmente em vigor [7] prevê contra-ordenações não menosprezáveis para a utilização de *unidades de medida não autorizadas:* coimas de PTE 5000 até PTE 500 000 para pessoas singulares e até PTE 6 000 000 para pessoas colectivas! Esperemos que nem o Estado nem os Governos vejam aqui, tão cedo, mais esta fonte de receita fácil...

B.7 Documentação

Tratando este artigo de um assunto amplamente regulamentado, a documentação de apoio é essencialmente constituída por referências normativas—normas portuguesas (NP), normas internacionais (ISO) e uma norma francesa (NF).

Em Portugal, toda a actividade de normalização está centralizada no IPQ (Instituto Português da Qualidade, Rua C à Avenida dos Três Vales, 2825 Monte da Caparica, Telef. 01-2948100, Telefax 01-2948101) onde os documentos referidos poderão ser. consultados ou adquiridos.

---

* Comité International des Poids et Mesures.

B.8 Bibliografia

[1] ISO 31-0:1992, Grandeurs et unités—Partie 0: Principes généraux.

[2] ISO 31-1:1992, Grandeurs et unités—Partie 1: Espace et temps.

ISO 31-2:1992, Grandeurs et unités—Partie 2: Phénomènes périodiques et connexes.

ISO 31-3:1992, Grandeurs et unités—Partie 3: Mécanique.

ISO 31-4:1992, Grandeurs et unités—Partie 4: Chaleur.

ISO 31-5:1992, Grandeurs et unités—Partie 5: Electricite et magnétisme.

ISO 31-ó:1992, Grandeurs et unités—Partie 6: Lumière et rayonnements électromagnétiques connexes.

ISO 31-7:1992, Grandeurs et unités—Partie 7: Acoustique.

ISO 31-8:1992, Grandeurs et unités—Partie 8: Chimie physique et physique moléculaire.

ISO 31-9:1992, Grandeurs et unités—Partie 9: Physique atomique et nucléaire.

ISO 31-10:1992, Grandeurs et unités—Partie 10: Réactions nucléaires et rayonnements ionisants.

ISO 31-12:1992, Grandeurs et unités—Partie 12: Nombres caractéristiques.

ISO 31-13:1992, Grandeurs et unités—Partie 13: Physique de l'état solide.

[3] NP-9 (1960), Escrita dos números.

[4] NP-18 (1960), Nomenclatura dos grandes números.

[5] ISO 1000:1992,Unités SI et recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unites.

[ó] NP-172 (1986), Sistema Internacional de Unidades.

[7] Ministério da Indústria e Energia, Decreto-Lei n.° 238/94, de 18 de Setembro, Diário da República, I Série-A, N.° 217, Lisboa, 19-091994.

[8] Norme Française NF X 02-003, Principes de l'écriture des nombres, des grandeurs, dés unités et des symboles, AFNOR (Association Française de Normalisation), Aout 1985.

[9] ISO 31-11:1992, Grandeurs et unités—Partie 11: Sygnes et symboles mathématiques à employer dans les sciences physiques et dans la technique.

[10] ALMEIDA, Guilherme de—*Sistema Internacional de Unidades (Sl), Grandezas e Unidades Físicas,* Plátano Editora, Lisboa, 1988.

C

Constantes Físicas

C.1 Conversões entre unidades

$1\ \text{eV} = 1.6021 \times 10^{-19}\ \text{J}$

$1\ \text{u.m.a.} = m_0 c_2 = 931.48\ \text{MeV}$

$1\ \text{Rydberg} = chR_\infty = 13.605\ \text{eV}$

C.2 Constantes matemáticas

	Número
π	3.14159
π^2	9.86960
$\sqrt{\pi}$	1.77245
e	2.71828
$\log_e 10$	2.30259
1 radiano	57.296°

C.3 Constantes Físicas

Constante	*Símbolo*	*Valor*	*Erro*	*Unidades*
Velocidade da luz no vazio	c	299792458		m s^{-1}
Permeabilidade do vazio	μ_0	$1.25663706143592 \times 10^{-6}$		N A^{-2}
Permitividade do vazio	ε_0	$8.854187817 \times 10^{-12}$		F m^{-1}
Constante de gravitação de Newton	G	$6.6725985 \times 10^{-11}$	$\pm 8.00712 \times 10^{-16}$	$\text{m}^3\ \text{kg}^{-1}\ \text{s}^{-2}$
Constante de Planck	h	$6.62607554 \times 10^{-34}$	$\pm 3.97565 \times 10^{-40}$	J s
Constante de Planck em eV		$4.135669212 \times 10^{-15}$	$\pm 1.2407 \times 10^{-21}$	eV s

Constante	*Símbolo*	*Valor*	*Erro*	*Unidades*
h-barra	$\hbar$	$1.0545726663 \times 10^{-34}$	$\pm 6.32744 \times 10^{-41}$	J s
h-barra em eV		$6.58212202 \times 10^{-16}$	$\pm 1.97464 \times 10^{-22}$	eV s
Planck, massa de	m_P	2.1767114×10^{-8}	$\pm 1.30603 \times 10^{-13}$	kg
Plank, comprimento de	l_P	1.616051×10^{-35}	$\pm 9.69631 \times 10^{-41}$	m
Plank, tempo de	t_P	$5.3905634 \times 10^{-44}$	$\pm 3.23434 \times 10^{-49}$	s
Carga elementar	e	$1.6021773349 \times 10^{-19}$	$\pm 4.80653 \times 10^{-26}$	C
Quantum de fluxo magnético	Φ_0	$2.0678346161 \times 10^{-15}$	$\pm 6.2035 \times 10^{-22}$	Wb
Josephson, quociente frequência-voltagem		483597671400000	$\pm 1.45079 \times 10^{+08}$	V^{-1} s^{-1}
Conductância quantizada de Hall		$3.8740461417 \times 10^{-5}$	$\pm 1.54962 \times 10^{-12}$	Ω^{-1}
Resistência quantizada de Hall	R_H	25812.805612	± 0.00103251	Ω
Magnetão de Bohr	μ_B	$9.274015431 \times 10^{-24}$	$\pm 2.7822 \times 10^{-30}$	J T^{-1}
Magnetão de Bohr em eV		$5.7883826352 \times 10^{-5}$	$\pm 4.63071 \times 10^{-12}$	eV T^{-1}
Magnetão de Bohr em Hz		13996241842	± 4198.87	T^{-1} s^{-1}
Magnetão de Bohr em número de onda		46.68643714	$\pm 1.40059 \times 10^{-5}$	m^{-1} T^{-1}
Magnetão de Bohr em kelvins		0.671709957	$\pm 5.37368 \times 10^{-6}$	K T^{-1}
Magnetão nuclear	μ_N	$5.050786617 \times 10^{-27}$	$\pm 1.51524 \times 10^{-33}$	J T^{-1}
Magnetão nuclear em eV		$3.1524516628 \times 10^{-8}$	$\pm 2.52196 \times 10^{-15}$	eV T^{-1}
Magnetão nuclear em Hz		7622591.423	± 2.28678	T^{-1} s^{-1}
Magnetão nuclear em número de onda		0.025426228177	$\pm 7.62787 \times 10^{-9}$	m^{-1} T^{-1}
Magnetão nuclear em kelvins		0.000365824631	$\pm 2.9266 \times 10^{-0}9$	K T^{-1}
Constante de estrutura fina	α	0.0072973530833	$\pm 2.91894 \times 10^{-10}$	
Constante de estrutura fina, inversa		137.035989561	$\pm 5.48144 \times 10^{-6}$	
Constante de Rydberg	Ry	10973731.53413	± 0.0109737	m^{-1}
Constante de Rydberg em Hz		$3.289841949939 \times 10^{+15}$	$\pm 3.28984 \times 10^{+6}$	s^{-1}
Constante de Rydberg em joules		$2.179874113 \times 10^{-18}$	$\pm 1.30792 \times 10^{-24}$	J
Constante de Rydberg em eV		13.60569814	$\pm 4.08171 \times 10^{-6}$	eV
Raio de Bohr	a_0	$5.2917724924 \times 10^{-11}$	$\pm 2.11671 \times 10^{-18}$	m
Energia de Hartree	E_h	$4.359748226 \times 10^{-18}$	$\pm 2.61585 \times 10^{-24}$	J
Energia de Hartree em eV		27.211396181	$\pm 8.16342 \times 10^{-6}$	eV
Quantum de circulação		0.00036369480733	$\pm 2.90956 \times 10^{-11}$	m^2 s^{-1}
Electrão, massa	m_e	$9.109389754 \times 10^{-31}$	$\pm 4.55469 \times 10^{-37}$	kg
Electrão, massa em u		0.00054857990313	$\pm 1.09716 \times 10^{-11}$	u
Electrão, massa em eV		510999.0615	± 0.1533	eV
Electrão-muão, razão de massas		0.0048363321871	$\pm 4.83633 \times 10^{-10}$	

Constante	*Símbolo*	*Valor*	*Erro*	*Unidades*
Electrão-protão, razão de massas		0.00054461701311	$\pm$ 1.08923 $\times 10^{-11}$	
Electrão-deuterão, razão de massas		0.0002724437076	$\pm$ 5.44887 $\times 10^{-12}$	
Electrão-partícula alfa, razão de massas		0.0001370933543	$\pm$ 2.74187 $\times 10^{-12}$	
Electrão, carga específica		-175881962530	$\pm$ -52764.6	C kg^{-1}
Electrão, massa molar		5.4857990313 $\times 10^{-7}$	$\pm$ 1.09716 $\times 10^{-14}$	kg mol^{-1}
Electrão, comprimento de onda de Compton	λ_C	2.4263105822 $\times 10^{-12}$	$\pm$ 1.94105 $\times 10^{-19}$	m
Electrão, comprimento de onda de Compton sobre 2π	$\bar{\lambda}_C$	3.8615932335 $\times 10^{-13}$	$\pm$ 3.08927 $\times 10^{-20}$	m
Electrão, raio clássico	r_e	2.8179409238 $\times 10^{-15}$	$\pm$ 2.81794 $\times 10^{-22}$	m
Electrão, secção eficaz de Thomson	σ_e	6.652461618 $\times 10^{-29}$	$\pm$ 1.33049 $\times 10^{-35}$	m^2
Electrão, momento magnético		9.284770131 $\times 10^{-24}$	$\pm$ 2.78543 $\times 10^{-30}$	J T^{-1}
Electrão, momento magnético em magnetões de Bohr		1.0011596521931		
Electrão, momento magnético em magnetões nucleares		1838.28200037	$\pm$ 3.67656 $\times 10^{-5}$	
Electrão, anomalia do momento magnético	a_e	0.0011596521931	$\pm$ 9.27722 $\times 10^{-12}$	
Electrão, factor-g	g_e	2.0023193043862		
Electrão-muão, razão de momentos magnéticos		206.7669673	$\pm$ 2.06767 $\times 10^{-5}$	
Electrão-protão, razão de momentos magnéticos		658.210688166	$\pm$ 6.58211 $\times 10^{-6}$	
Muão, massa		1.883532711 $\times 10^{-28}$	$\pm$ 1.13012 $\times 10^{-34}$	kg
Muão, massa em u		0.11342891317	$\pm$ 1.13429 $\times 10^{-8}$	u
Muão, massa em eV		105658389.34	$\pm$ 31.6975	eV
Muão-electrão, razão de massas		206.7682623	$\pm$ 2.06768 $\times 10^{-5}$	
Muão, massa molar		0.00011342891317	$\pm$ 1.13429 $\times 10^{-11}$	kg mol^{-1}
Muão, momento magnético		4.490451415 $\times 10^{-26}$	$\pm$ 1.34714 $\times 10^{-32}$	J T^{-1}
Muão, momento magnético em magnetões de Bohr		0.0048419709771	$\pm$ 4.84197 $\times 10^{-10}$	
Muão, momento magnético em magnetões nucleares		8.890598113	$\pm$ 8.8906 $\times 10^{-7}$	
Muão, anomalia do momento magnético do muão	a_μ	0.001165923084	$\pm$ 8.16146 $\times 10^{-9}$	
Muão, factor-g	g_μ	2.00233184617	$\pm$ 1.60187 $\times 10^{-8}$	
Muão-protão, razão de momentos magnéticos		3.1833454747	$\pm$ 3.18335 $\times 10^{-7}$	
Protão, massa	m_p	1.67262311 $\times 10^{-27}$	$\pm$ 8.36312 $\times 10^{-34}$	kg
Protão, massa em u		1.00727647012	$\pm$ 1.00728 $\times 10^{-8}$	u

Constante	*Símbolo*	*Valor*	*Erro*	*Unidades*
Protão, massa em eV		938272312.8	± 281.482	eV
Protão-electrão, razão de massas		1836.15270137	$\pm 3.67231 \times 10^{-5}$	
Protão-muão, razão de massas		8.880244413	$\pm 8.88024 \times 10^{-7}$	
Protão, carga específica do		95788309.29	± 28.7365	$C\ kg^{-1}$
Protão, massa molar		0.00100727647012	$\pm 1.00728 \times 10^{-11}$	$kg\ mol^{-1}$
Protão, comprimento de onda de Compton	λ_{Cp}	$1.3214100212 \times 10^{-15}$	$\pm 1.05713 \times 10^{-22}$	m
Protão, momento magnético		$1.4106076147 \times 10^{-26}$	$\pm 4.23182 \times 10^{-33}$	$J\ T^{-1}$
Protão, momento magnético em magnetões de Bohr		0.00152103220215	$\pm 1.52103 \times 10^{-11}$	
Protão, momento magnético em magnetões nucleares		2.79284738663	$\pm 5.58569 \times 10^{-8}$	
Protões, correcção diamagnética de blindagem (H_2O, amostra esférica, 298.15 K)	σ_{H2O}	2.568915×10^{-5}		
Protão blindado, momento magnético (H_2 O, amostra esférica, 298.15 K)	$\mu_{p'}$	$1.4105713847 \times 10^{-26}$	$\pm 4.23171 \times 10^{-33}$	$J\ T^{-1}$
Protão blindado, momento magnético em magnetões de Bohr		0.00152099312917	$\pm 1.52099 \times 10^{-11}$	
Protão blindado, momento magnético em magnetões nucleares		2.79277564264	$\pm 5.58555 \times 10^{-8}$	
Protão, razão giromagnética	γ_p	267522128.81	± 80.2566	$T^{-1}\ s^{-1}$
		42577469.13	± 12.7732	$T^{-1}\ s^{-1}$
Protão, razão giromagnética não corrigida (H_2O, amostra esférica, 298.15 K)	$\gamma_{p'}$	267515255.81	± 80.2546	$T^{-1}\ s^{-1}$
		42576375.13	± 12.7729	$T^{-1}\ s^{-1}$
Neutrão, massa	m_n	$1.67492861 \times 10^{-27}$	$\pm 8.37464 \times 10^{-34}$	kg
Neutrão, massa em u		1.00866490414	$\pm 1.00866 \times 10^{-8}$	u
Neutrão, massa em eV		939565632.8	± 281.87	eV
Neutrão-electrão, razão de massas		1838.6836624	$\pm 3.67737 \times 10^{-5}$	
Neutrão-protão, razão de massas		1.0013784049		
Neutrão, massa molar		0.00100866490414	$\pm 1.00866 \times 10^{-11}$	$kg\ mol^{-1}$
Neutrão, comprimento de onda de Compton	γ_{Cn}	$1.3195911012 \times 10^{-15}$	$\pm 1.05567 \times 10^{-22}$	m
Neutrão, momento magnético		$9.66237074 \times 10^{-27}$	$\pm 3.86495 \times 10^{-33}$	$J\ T^{-1}$
Neutrão, momento magnético em magnetões de Bohr		0.0010418756325	$\pm 2.08375 \times 10^{-10}$	

Constante	*Símbolo*	*Valor*	*Erro*	*Unidades*
Neutrão, momento magnético em magnetões nucleares		1.9130427545	± 3.82609 $\times 10^{-07}$	
Neutrão-electrão, razão de momentos magnéticos		0.0010406688225	± 2.08134 $\times 10^{-10}$	
Neutrão-protão, razão de momentos magnéticos		0.6849793416	± 1.36996 $\times 10^{-7}$	
Deuterão, massa	m_d	3.34358602 $\times 10^{-27}$	± 1.67179 $\times 10^{-33}$	kg
Deuterão, massa em u		2.01355321424	± 2.01355 $\times 10^{-8}$	u
Deuterão, massa em eV		1875613395.7	± 562.684	eV
Deuterão-electrão, razão de massas		3670.48301475	± 7.34097 $\times 10^{-5}$	
Deuterão-protão, razão de massas		1.9990074966		
Deuterão, massa molar		0.00201355321424	± 2.01355 $\times 10^{-11}$	kg mol^{-1}
Deuterão, momento magnético	μ_d	4.330737515 $\times 10^{-27}$	± 1.29922 $\times 10^{-33}$	J T^{-1}
Deuterão, momento magnético em magnetões de Bohr		0.000466975447991	± 4.66975 $\times 10^{-12}$	
Deuterão, momento magnético em magnetões de nucleares		0.85743823024	± 1.71488 $\times 10^{-8}$	
Deuterão-electrão, razão de momentos magnéticos		0.000466434546091	± 4.66435 $\times 10^{-12}$	
Deuterão-protão, razão de momentos magnéticos		0.307012203551	± 3.07012 $\times 10^{-9}$	
Constante de Avogadro	N_A	6.022136736 $\times 10^{+23}$	± 3.01107 $\times 10^{+17}$	mol^{-1}
Constante de massa atómica	m_u	1.66054021 $\times 10^{-27}$	± 8.3027 $\times 10^{-34}$	kg
Constante de massa atómica em eV		931494322.8	± 279.448	eV
Constante de Faraday	F	96485.30929	± 0.0289456	C mol^{-1}
Constante de Planck molar		3.9903132336 $\times 10^{-10}$	± 3.19225 $\times 10^{-17}$	J s mol^{-1}
		0.1196265811	± 9.57013 $\times 10^{-9}$	J m mol^{-1}
Constante dos gases, molar	R	8.3145107	± 6.65161 $\times 10^{-5}$	J mol^{-1} K^{-1}
Constante de Boltzmann	k	1.38065812 $\times 10^{-23}$	± 1.10453 $\times 10^{-28}$	J K^{-1}
Constante de Boltzmann em eV		8.61738573 $\times 10^{-5}$	± 6.89391 $\times 10^{-10}$	eV K^{-1}
Constante de Boltzmann em Hz		20836741800	± 166694	K^{-1} s^{-1}
Constante de Boltzmann em números de onda		69.5038759	± 0.000556031	m^{-1} K^{-1}
Volume molar (gás ideal), PTN	V_m	0.0224141019	± 1.79313 $\times 10^{-7}$	m^3 mol^{-1}
Constante de Loschmidt	n_0	2.68676323 $\times 10^{+25}$	± 2.14941 $\times 10^{+20}$	m^{-3}
Constante de Stefan-Boltzmann	σ	5.6705119 $\times 10^{-8}$	± 1.70115 $\times 10^{-13}$	W m^{-2} K^{-4}
Constante de radiação, primeira	c_1	3.741774922 $\times 10^{-16}$	± 2.24506 $\times 10^{-22}$	W m^2

Constante	*Símbolo*	*Valor*	*Erro*	*Unidades*
Constante de radiação, segunda	c_2	0.0143876912	± 1.15102 ×10^{-7}	m K
Constante de Wien, lei do deslocamento	b	0.00289775624	± 2.3182 ×10^{-08}	m K
Electrão volt	eV	1.6021773349 ×10^{-19}	± 4.80653 ×10^{-26}	J
Unidade de massa Atómica	u	1.66054021 ×10^{-27}	± 8.3027 ×10^{-34}	kg
Pressão atmosférica	atm	101325		Pa
Aceleração da gravidade	g_n	9.80665		m s^{-2}
BIPM- ohm de referência, $\Omega_{69\text{-}B1}$ em 1-Jan-85	Ω_{B185}	1		Ω
BIPM-Taxa de variação de $\Omega_{69\text{-}B1}$	$d\Omega_{69\text{-}B1}/dt$	-0.056615		μΩ/yr
BIPM-volt de referência 483 694 GHz(h/2e)	$V_{76\text{-}B1}$	1		V
BIPM-ampere de referência A_{BIPM}	A_{B185}	1		A
Unidade Cu x:	xu[$CuK_{\alpha 1}$]	1.002077897 ×10^{-13}	± 7.01455 ×10^{-20}	m
Unidade Mo x:	xu[$MoK_{\alpha 1}$]	1.0020993845 ×10^{-13}	± 4.0084 ×10^{-20}	m
AA *:	Å*	1.0000148192 ×10^{-10}	± 9.00013 ×10^{-17}	m
Si, parâmetro da rede (no vazio, 295.65 K)	a	5.431019611 ×10^{-10}	± 1.0862 ×10^{-16}	m
Si, espaçamento interplanar no plano (220)	d_{220}	1.920155404 ×10^{-10}	± 3.84031 ×10^{-17}	m
Si, volume molar	V_m[Si]	1.2058817989 ×10^{-5}	± 8.44117 ×10^{-12}	m^3 mol^{-1}

D

Potências de 10

A notação de potências de 10 é muito utilizada em todos os ramos da ciência e tecnologia. O seu uso apresenta inúmeras vantagens, quer do ponto de vista de expressão de números, quer do ponto de vista de aritmética.

Tornando manuseáveis números desmesuradamente grandes ou pequenos, esta notação facilita-nos a vida. Com efeito a leitura de artigos científicos seria muito aborrecida se, cada vez que quiséssemos referir a grandeza da velocidade da luz se tivesse que escrever 299 790 000 em vez de 2.9979×10^8, ou, pior ainda, o número de Avogadro, 602 250 000 000 000 000 000 000 em vez de 6.0225×10^{23}. Os números muito pequenos também seriam uma fonte de monotonia, por exemplo, 0,000 000 000 000 000 000 160 21 em vez de 1.6021×10^{-19} para o valor da carga do electrão.

A aritmética destes números é também muito facilitada graças às potências de 10. Com efeito a multiplicação de dois números assim expressos resume-se à multiplicação das mantissas (o número que está antes do sinal $\times$) e á soma dos expoentes com o sinal algébrico, do mesmo modo a divisão é feita dividindo as mantissas e subtraindo os expoentes

$$(2 \times 10^8) \text{ x } (3 \times 10^{-3}) \;=\; 2 \times 3 \times 10^{(8-3)} \;=\; 6 \times 10^5$$

$$(3 \times 10^8) \div (2 \times 10^{-3}) \;=\; \frac{3}{2} \times 10^{(8-(-3))} \;=\; 1.5 \times 10^{11}$$

Está muito bem dizer, ou escrever, 3×10^8, mas nós não comunicamos sómente com números. Muitos dos números que utilizamos têm nomes, são designados por uma palavra. Em seguida apresenta-se uma lista de alguns desses nomes quer antigos, quer modernos e seleccionados de diversas tradições aritméticas.

Nomes métricos

Prefixos oficiais usados para múltiplos e sub-múltiplos de 10^3:

atto-	a	10^{-18}
femto-	f	10^{-15}
pico-	p	10^{-12}
nano-	n	10^{-9}
micro-	µ	10^{-6}
mili	m	10^{-3}
unidade		10^0
quilo-	k	10^3
mega-	M	10^6
giga-	G	10^9
tera-	T	10^{12}
peta-	P	10^{15}
exa-	E	10^{18}

Assim quilómetro (km) ou milímetro (mm). Estes prefixos derivam quase todos do Grego clássico.

Não oficiais:

centi-	10^{-2}
deci-	10^{-1}
deca-	10^1
hecto-	10^2

Estes permitem refinar a nomenclatura perto da unidade

Nomes vulgares

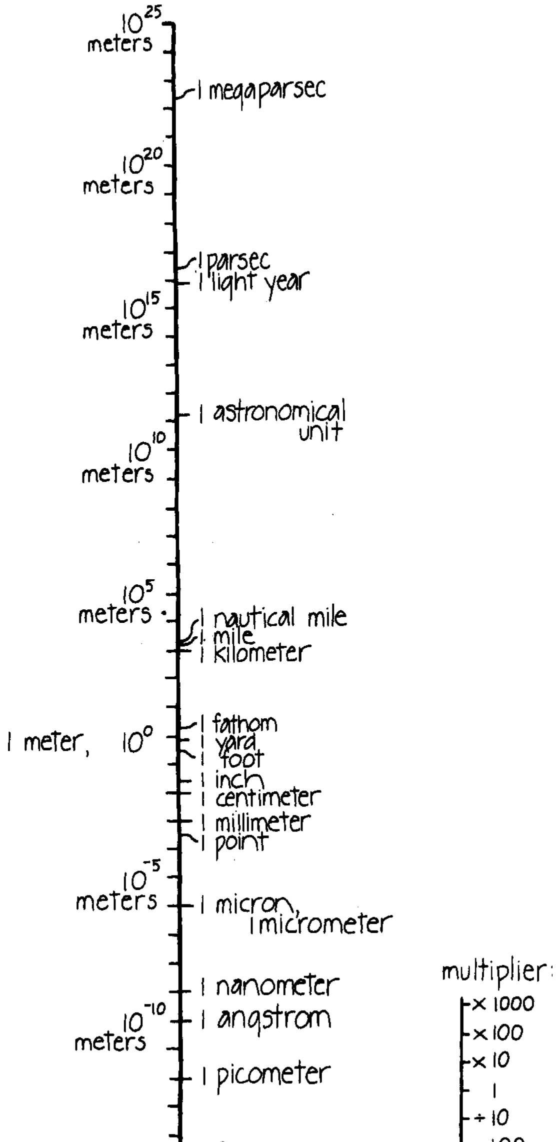
	Americanos	Europeus
unidade	10^0	10^0
dezenas	10^1	10^1
centenas	10^2	10^2
milhares	10^3	10^3
milhões	10^6	10^6
biliões	10^9	10^{12}
triliões	10^{12}	10^{18}

Nomes Hindús

ek	10^0
das	10^1
san	10^2
hazar	10^3
lakh	10^5
crore	10^7
arabh	10^9
carabh	10^{11}
nie	10^{13}
padham	10^{15}
sankh	10^{17}

E

Unidades de Comprimento



O homem inicialmente criava a sua própria comida e construía a sua própria casa, não tinha necessidade, nem interesse, em ter unidades formais de medida. Mas o desenvolvimento do comércio exigiu acordos sobre unidades de medida. Na Inglaterra a jarda legal ainda está disponível, numa parede do Observatório de Greenwich, para o uso dos Londrinos, e, em Paris ainda existe um metro numa parede para uso do público.

O sistema de unidades a que chamamos métrico foi o resultado do trabalho de sábios da Paris Revolucionária na década de 1790, com o objectivo de racionalizar os diversos sistemas de medidas então em uso em França. Mas mesmo a sua determinação na novidade e racionalismo encontrou alguns limites e oposições, nomeadamente no sistema de contagem das horas, minutos e segundos, que continuou não-decimal. A continuação deste sistema não foi um esquecimento revolucionário—o sistema métrico do dia com dez horas, cada uma com cem minutos de cem segundos, foi adoptado formalmente, mas este esquema deparou com uma resistência feroz da parte de toda a população. Nessa época o único mecanismo que existia em toda a casa de classe média era um relógio mecânico. Ninguém se dispôs a deixar que esse artefacto, orgulhosamente possuído, passasse a ser obsoleto de um momento para o outro graças a um mero critério de consistência. Neste caso a prática ganhou à teoria.

Da mesma maneira, ainda hoje em dia, muitas pessoas, que utilizam unidades práticas em determinados contextos resistem à mudança para unidades racionais. Em seguida damos uma lista de unidades de medida linear que ainda mantém alguma utilidade nestes dias métricos, muitas mesmo dentro das ciências.

E.1 Distâncias Cósmicas

parsec

Esta palavra foi obtida de "*par*allax of one *sec*ond." O *parsec* é vulgarmente utilizado pelos astrónomos pois está relacionado com o método básico de medição de distâncias interestelares por triangulação. A paralaxe padrão é a mudança aparente de posição de um objecto distante num intervalo de seis meses, à medida que o observador se move na órbita terrestre. O *parsec* é definido de modo que o raio da órbita da terra observada de uma distância de um parsec abrange um ângulo de um segundo. A estrela mais próxima do sol está a uma distância maior que um parsec.

ano-luz

Esta unidade interestelar baseia-se na relação entre distância cósmica e o espaço percorrido pela luz no tempo.

A velocidade da luz no vazio é $3{,}00 \times 10^8$ metros por segundo; num ano (365,25 dias) a luz move-se uma distância de $9{,}46 \times 10^{15}$ metros, que se costuma arredondar para 10^{16} metros, em particular porque sómente algumas, poucas, distâncias cósmicas são conhecidas com precisão, e, portanto, o arredondamento não conduz a nenhuma perca grave de precisão.

unidade astronómica

A distância média entre o sol e a terra é uma unidade muito prática na observação do sistema solar; é um comprimento típico nas órbitas dos planetas. $1\text{AU} = 1{,}50 \times 10^{11}$ metros.

Nota: 1 parsec = 3,26 anos-luz = 206 300 AU. As escalas interestelares e do sistema solar são muito diferentes. As distâncias intergalácticas ascendem a megaparsecs.

E.2 Comprimentos Terrestres

milhas, léguas, etc.

Estas unidades ainda são muito utilizadas para referir distâncias relacionadas com viagens terrestres, ou no mar, ou distâncias entre cidades. Ninguém mede tecidos à milha ou distâncias de viagens em parsecs.

jardas, pés, metros

Estas são as distâncias da escala humana. Muitas destas unidades foram definidas a partir da dimensão do braço (pé) de algum rei. São apropriadas para medir a dimensão de salas, pessoas, barcos, carros, etc. Os tecidos medem-se ao metro ou à jarda. O metro foi definido de modo mais universal tendo sido introduzido com o intuito de suplantar a jarda e o pé, na altura de uso muito geral. O metro foi relacionado com o tamanho da terra; definiu-se que um quadrante da circunferência da terra media exactamente 10^7 metros, ou 10^4 quilómetros. Em 1981 o metro foi definido com maior precisão em termos do comprimento de onda de risca espectral atómica específica. Um metro são 1 650 763.73 comprimentos de onda no vazio da radiação correspondente à transição entre os níveis $2p_{10}$ e $5d_5$ do átomo de crípton-86.

polegadas, centímetros, etc.

O polegar do mesmo rei? Trata-se de unidades à escala humana usadas para medir objectos manuseáveis: papéis, mobília, ferramentas, bolos, etc.

linha, milímetro, ponto

Estas unidades para trabalho minúsculo são relativamente modernas. A "linha" Francesa e Inglesa do Séc XVII tem cerca de 2 milímetros, e o "ponto" do tipógrafo mede cerca de 0,35 mm. Os filmes cinematográficos e de fotografia, relógios e outros são vulgarmente medidos em milímetros. O pioneiro do microscópio Antony von Leeuwenhoek utilizou grãos de areia, grossa e fina, para as suas medidas de comprimentos microscópicos. Ele contou cem grãos de areia fina na polegada comum do seu tempo e lugar. Unidades mais pequenas são modernas e fazem parte, em geral, do sistema métrico.

E.3 Distâncias Atómicas

ångstroms, fermis, etc.

Quando os átomos começaram a ser observados rotineiramente surgiram novas unidades de comprimento especializadas. O física Sueco Anders Ångström fez medidas pioneiras, no século passado, de comprimentos de onda do espectro solar. Ele exprimiu os seus resultados em termos de uma unidade com 10^{-10} metros. Esta unidade, à qual foi atribuída o seu nome, ångstrom (Å), continua a ser utilizada informalmente. É conveniente pois os átomos medem alguns ångstrom. A tendência para o uso destas unidades pouco "métricas" é grande; na física nuclear, os núcleos e as partículas, são medidos em fermis, em homenagem ao físico Italiano Enrico Fermi. 1 fermi é igual a 10^{-15} metros.

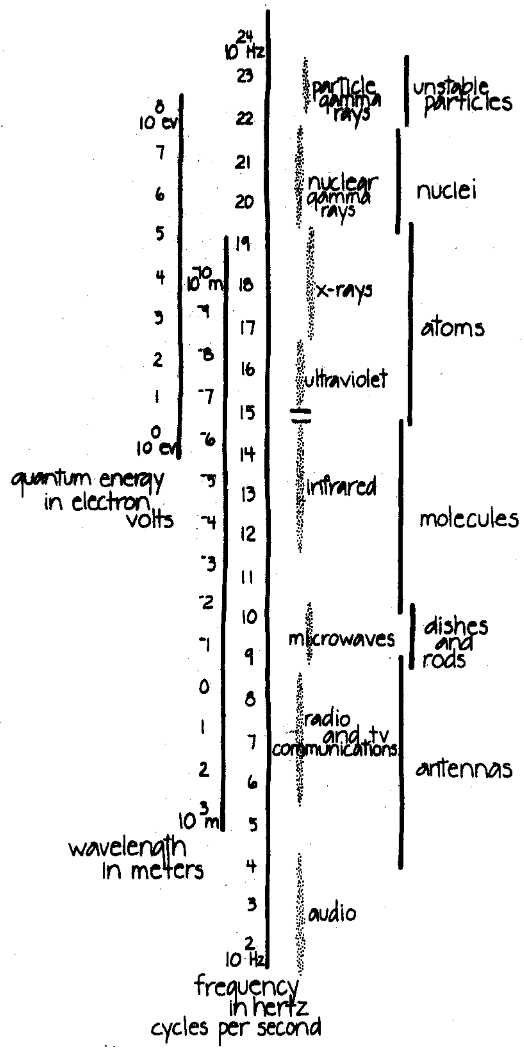
E.4 Ângulos e Tempo

Os ângulos são medidos por um sistema não métrico que remonta ao tempo dos Assírios na Babilónia. Um círculo tem 36o graus; 1 grau = 60 minutos-arco; 1 minuto = 60 segundos-arco (quando não haja ambiguidade entre graus e horas, suprime-se o sufixo -arco das designações de minuto-arco e segundo-arco). Um segundo é, aproximadamente, o menor ângulo subentendido pela imagem duma estrela difundida pelo movimento da atmosfera. Esta página se for observada de uma distância de cerca de 40 km subentende um arco de um segundo.

As medidas de tempo partilham com os ângulos o uso cuneiforme de potências de 60. Note-se que um ano de 365,25 dias de 24 horas, cada uma com 60 minutos de 60 segundos, tem cerca de $3{,}16\times10^{7}$ segundos.

F

O Espectro Electromagnético



F.1 Lendo o Arco-Íris

Experimente rodar lentamente o botão de sintonização de um rádio. À medida que o ponteiro se desloca na escala de frequências irá encontrar diferentes sinais de estações diversas, algumas alto outras baixo. Não seria difícil desenhar um gráfico da intensidade sonora em função da leitura do ponteiro. Encontraria um conjunto de picos, alguns altos, outros baixos, e com espaço entre eles onde só se ouve um ruído baixo. Esse gráfico é um espectro de ondas de rádio para o local, e altura no tempo, em que se encontrar.

Naturalmente que não é um espectro completo pois pode sintonizar ondas de FM, ondas médias (AM), ondas curtas (LW) ou mesmo a TV. Todos estes sinais são energia, do mesmo tipo, recebida pelo aparelho: energia electromagnética. Muito para além do alcance de qualquer sintonizador chegaria às ondas na região do visível. Chamamos *Luz* à radiação electromagnética entre o vermelho e o violeta que podem ser detectados pelos nossos olhos. O nome de um aparelho que seleccione canais no visível chama-se um espectrómetro, e o seu registo é fotográfico. Também se podem encontrar sinais muito para além do visível cuja importância não é nada de desprezar.

A figura apresentado no início do apêndice, mostra toda a gama de radiação electromagnética, que nos permite obter tanta informação acerca do mundo em que vivemos, numa escala ordenada. Essa escala pode ser marcada de três maneiras diferentes, qualquer uma delas igualmente válida. Uma das descrições da radiação dá ênfase ao seu comportamento temporal, a *frequência* da radiação, medida em ciclos por segundo ou hertz (Hz). Outra descrição descreve as ondas como um padrão em movimento no espaço, o *comprimento de onda* medido em metros ou múltiplos. Finalmente, para todo o tipo de radiação há uma energia máxima que pode ser transferida numa interacção atómica, é o *quantum de energia*, medido em electrões-volt (eV).

No extremo das ondas de rádio usa-se, geralmente, a frequência para descrever as ondas, pois as técnicas de rádio tornam discerníveis variações no tempo. Isto é virtualmente impossível no outro extremo do espectro. Na gama média usa-se muito o comprimento de onda pois, entre a banda milimétrica e os raios-X, existem técnicas capazes de realçar a variação espacial. No extremo de energias elevadas, os raios gama (γ), usa-se exclusivamente a energia para caracterizar estas ondas. Nesta zona é fácil medir energias transferidas mas impossível observar as variações intrínsecas espaciais ou temporais.

Todas estas radiações apresentam algumas propriedades física comuns. A sua velocidade no vazio é sempre a mesma. É a velocidade máxima limite para qualquer sistema físico, um milhão de vezes supersónica. Todas as radiações são emitidas e absorvidas devido ao movimento de cargas eléctricas (e efeitos magnéticos relacionados), por isso são chamadas electromagnéticas. Uma onda sonora com uma frequência de 1 kHz, não é o mesmo fenómeno que uma onda electromagnética com a mesma frequência embora os meios electrónicos para transformar uma na outra sejam vulgares. A onda electromagnética é um padrão de campos eléctricos e magnéticos variáveis que existe mesmo no vazio; a onda sonora é um padrão de variações de pressão no ar, ou outro meio material, e que desaparece no vazio.

Praticamente toda a radiação electromagnética, desde as frequências mais baixas até energias quânticas da ordem de 100 mil electrões-volt (100 keV), é produzida por transferências de energia entre electrões em movimento, quer isolados (nos átomos) quer em quantidades inumeráveis em correntes eléctricas. Acima desta energia a radiação é de origem nuclear, sendo causada por fenómenos semelhantes das partículas nucleares. Para energias ainda maiores, acima de 100 milhões de electrões-volt (100 MeV) as transferências de energia que dão origem, ou absorvem, a esta radiação envolvem partículas elementares como os quarks e outras.

F.2 Análise de Espectros

Na nossa sala podemos rodar o botão do sintonizador e contar, e ordenar, as estações emissoras na nossa vizinhança. Isso seria um espectro de rádio local. Do mesmo modo pode-se registar espectros na região óptica. Estes espectros dão informação sobre a composição química da matéria que serve de fonte de luz, quer esta esteja na bancada do laboratório ao pé de nós, quer esteja numa estrela longínqua. Os emissores de frequências visíveis específicas são certos átomos ou moléculas particulares. Do mesmo modo que a frequência de emissão de uma estação de rádio depende de características específicas da sua construção, também as frequências emitidas de átomos e moléculas dependem da sua estrutura intrínseca. Muito antes de se conhecer em pormenor a estrutura interna dos átomos já se utilizavam os seus padrões espectrais como uma espécie de assinatura atómica. Uma vez observado o mesmo padrão de espectro óptico numa estrela longínqua e no laboratório, era fácil inferir quais os elementos presentes nessa estrela.

Na figura anterior mostra-se um espectro da estrela Arcturus—interrupções negras num brilho de fundo. Neste caso uma camada de gás entre a fonte de luz e o observador impôs a sua assinatura por meio das interacções preferenciais dos elementos presentes absorvendo a luz que a atravessa.

Mais impressionante ainda é o espectro que se mostra a seguir. É um espectro do átomo de hidrogénio, observado numa descarga eléctrica num laboratório. Neste caso a composição atómica está bem estabelecida.

Agora, a simplicidade e a regularidade da assinatura espectral de um átomo simples é bem clara. Bohr utilizou esta ordem invisível (a relação numérica entre os valores das frequências destas linhas espectrais), de modo análogo às leis de Kepler. O movimento quântico dos electrões não é directamente observável, como o movimento dos planetas, mas a regularidade da sua assinatura espectral levou à descoberta da estrutura dos átomos, revelando a estrutura invisível dos electrões em torno do núcleo. Do mesmo modo os raios gama emitidos pelos núcleos e partículas elementares constituem o material de partida para a determinação da estrutura do mundo ultramicroscópico. Os espectros dão informação sobre os estados quânticos de qualquer sistema radiante.

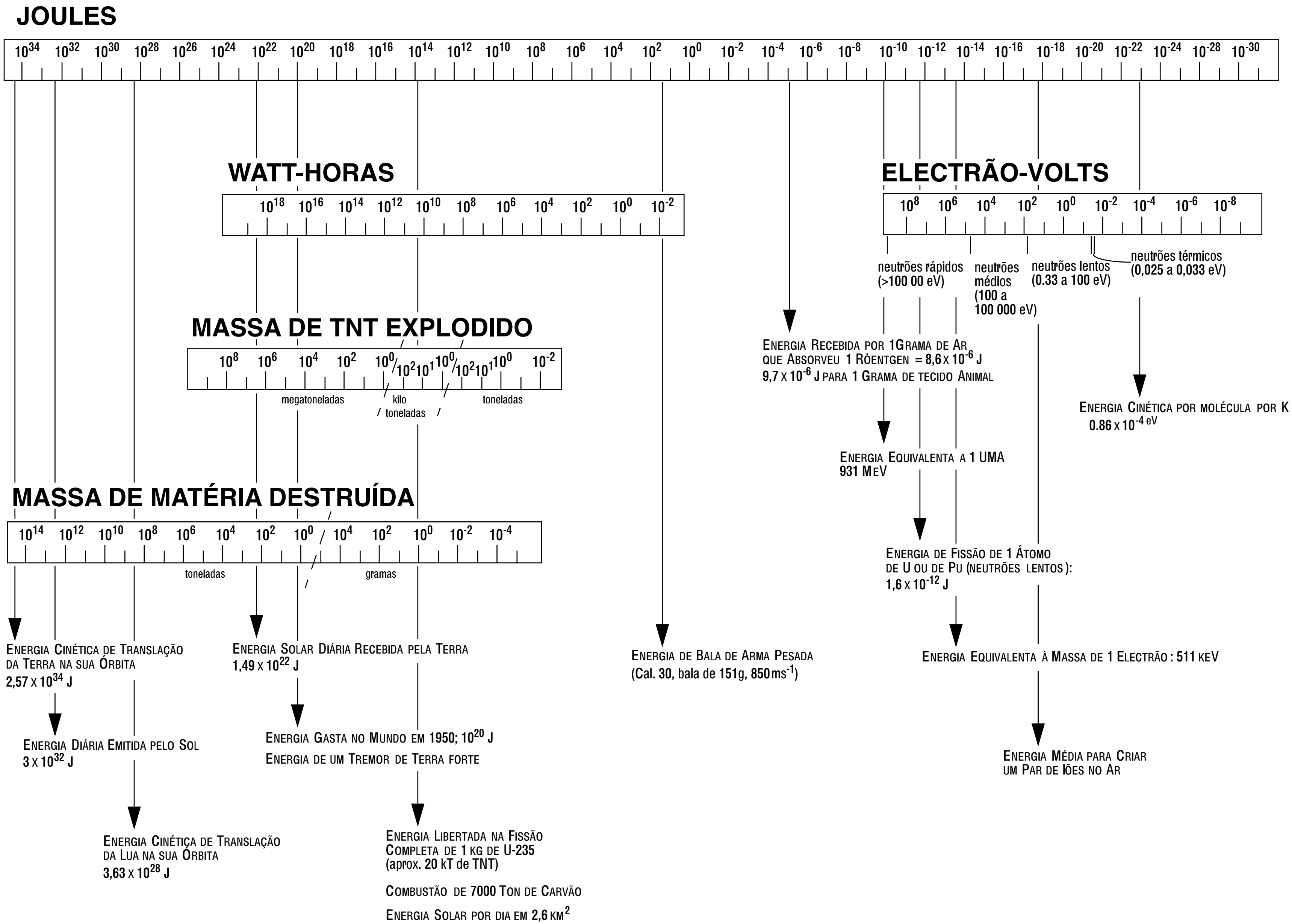
Finalmente, pode reconhecer-se um espectro num corpo celeste, pelas razões entre as diferentes frequências, por exemplo, mas pode suceder que as frequências individuais dos picos não coincidam com padrões realizados no laboratório. Podem estar todos, por exemplo, deslocados na direcção do vermelho de uma parte por mil. Este fenómeno é o conhecido efeito de Döppler, assim referido em honra ao Físico Austríaco do Séc. XIX que o descobriu. A frequência de uma fonte de radiação (luminosa, sonora ou outra) que se desloca em relação ao observador é alterada relativamente ao seu valor quando em repouso. Se a fonte se aproxima do observador a frequência aumenta—desvio para o azul no caso da luz, ou para sons mais agudos no caso do som,—se a fonte se afasta do observador a frequência diminui—desvio para o vermelho no caso da luz, ou para sons mais graves no caso do som. O efeito de Döppler permite determinar a velocidade de qualquer fonte de radiação relativamente ao detector. Não é necessário esperar vários séculos para mudarmos de posição relativa. O desvio causado por este efeito, o desvio de Döppler, funciona para qualquer banda de frequências desde que se consiga detectar um padrão conhecido de radiação. É a pedra de toque para todos os estudos astronómicos, e é a única maneira de verificar a rápida recessão das galáxias distantes—o famoso desvio para o vermelho—que se acredita ser o efeito da expansão do universo.

Basta um exemplo para fixar a relação entre as três escalas utilizadas para caracterizar a radiação; a frequência é directamente proporcional à energia quântica e inversamente proporcional ao comprimento de onda. A radiação electromagnética com um comprimento de onda de um micron, 10^{-6} metros, está um pouco além do que o olho vê no vermelho (infra-vermelho próximo), tem uma frequência de $3{,}00 \times 10^{14}$ hertz e uma energia quântica de 1,24 electrão volt.

G

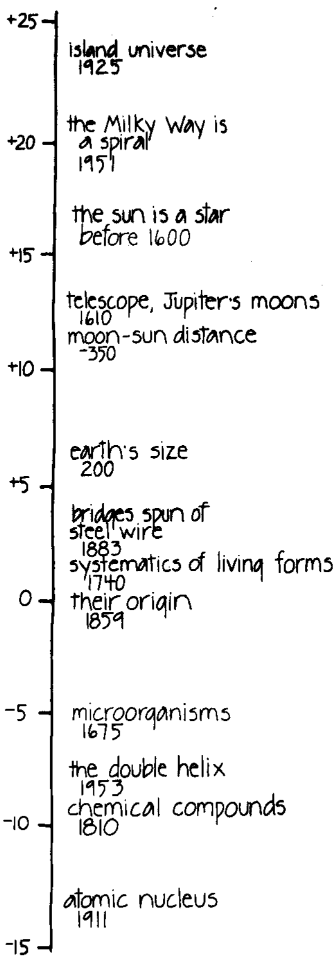
Gamas de Energia

No diagrama da página seguinte apresentam-se diversas escalas utilizadas para referir energias, comparadas com a escala do Sistema SI e com a indicação de diversos valores típicos de energias desde a energia térmica por molécula (10^{-23} J) até à energia média da Terra na sua órbita (10^{34} J).


JOULES
WATT-HORAS
ELECTRÃO-VOLTS
MASSA DE TNT EXPLODIDO
megatoneladas
kilo toneladas
toneladas
MASSA DE MATÉRIA DESTRUÍDA
toneladas
gramas
neutrões rápidos (>100 00 eV)
neutrões médios (100 a 100 000 eV)
neutrões lentos (0.33 a 100 eV)
neutrões térmicos (0,025 a 0,033 eV)
Energia Recebida por 1Grama de Ar que Absorveu 1 Röentgen = 8,6 x 10^{-6} J
9,7 x 10^{-6} J para 1 Grama de tecido Animal
Energia Cinética por molécula por K
0.86 x 10^{-4} eV
Energia Equivalenta a 1 UMA
931 MeV
Energia de Fissão de 1 Átomo de U ou de Pu (neutrões lentos):
1,6 x 10^{-12} J
Energia Cinética de Translação da Terra na sua Órbita
2,57 x 10^{34} J
Energia Solar Diária Recebida pela Terra
1,49 x 10^{22} J
Energia de Bala de Arma Pesada
(Cal. 30, bala de 151g, 850ms^{-1})
Energia Equivalenta à Massa de 1 Electrão : 511 keV
Energia Diária Emitida pelo Sol
3 x 10^{32} J
Energia Gasta no Mundo em 1950; 10^{20} J
Energia de um Tremor de Terra forte
Energia Média para Criar um Par de Iões no Ar
Energia Cinética de Translação da Lua na sua Órbita
3,63 x 10^{28} J
Energia Libertada na Fissão Completa de 1 kg de U-235
(aprox. 20 kT de TNT)
Combustão de 7000 Ton de Carvão
Energia Solar por dia em 2,6 km^2

H

Cronologia



Apresenta-se em seguida uma selecção de datas e de autores de descobertas, inventores, primeiros desenvolvimentos e das primeiras formulações convincentes dos conceitos que fundamentam o nosso conhecimento actual da natureza. Esta lista não se encontra ordenada por datas mas pela escala física aproximada relativa a cada descoberta. Mostra-nos quando começá-mos a perceber cada ordem de grandeza.

Naturalmente que uma lista simples como esta pode ser um pouco enganadora, a história das ideias e descobertas é muito complicada e intricada para poder ser descrita de um modo tão sumário. Há muita incerteza em algumas das datas; por vezes referem-se à descoberta, outras vezes à publicação. Muitas destas descobertas tiveram os seus precursores e rivais, alguns nomes famosos são referidos para, em parte, ajudar a localiza os grandes trabalhos no tempo. Esta lista favorece um pouco acontecimentos com uma forte influência no modelo visual do mundo

10^{25} metros		
Descoberta a radiação de fundo do Universo	1965	Penzias & Wilson
Reconhecimento dos Quasars	1963	Schmidt
Aglomerados de galáxias têm a mesma velocidade	1917	Slipher
'Universo de ilhas'; as galáxias são Vias-Lácteas distantes:		
—especulação	1755	Kant
—verificação	1925	Hubble
Os núcleos de algumas galáxias estão activos	1943	Seyfert
Observada a forma de espiral em nébulas	1850	Lord Rosse
As galáxias contém populações de estrelas novas e velhas	1944	Baade
Novos canais de observação abertos para a astronomia:		
—rádio (Via-Láctea)	1933	Jansky
—primeira rádio-galáxia distante	1949	Bolton, Stanley & Slee
—Raios X (para além do sol)	1962	Rossi, Giacconi, Gursky & Paolini
—infravermelho (a elevada altitude)	1968	Becklin & Neugebauer
—espectro electromagnético	1867	Maxwell
	1880	Hertz
Nuvens de Magalhães tornadas conhecidas dos Europeus	1516	Corsali
Observação da nebulosa Andromeda:		
—olho nú	970	Al-Sufi
—telescópio	1612	Marius
10^{20} metros		
Via-Láctea, a nossa galáxia:		
—o seu tamanho	1918	Shapley
—a sua forma espiral	1951	Morgan, Sharpless & Oster-brock
Via-Láctea é um conjunto de estrelas	1610	Galileu
Nebulosas escuras:		
—observadas a olho nú	pré-história	
—demonstrado que são compostas por pó	1923	Wolf
Nebulosas brilhantes:		
—observadas no telescópio	1610	Peiresc
—conteúdo gasoso	1864	Huggins
—iluminadas por estrelas brilhantes	1922	Hubble
Supernovas são reconhecidas como uma classe	1934	Baade & Zwicky
O sol é uma estrela, e todas as estrelas são sóis:	Cerca de 1600	
—primeiros resultados quantitativos	1684	Huygens

Estrelas duplas seguem as leis da gravidade	1830	Savary
Estrelas (como o sol) são compostas por elementos químicos familiares	1863	Huggins
Fotografias de espectros estelares	1872	Henry Draper
Distâncias entre estrelas medidas por triangulação	1838	Bessel
10^{15} metros		
Nuvem de cometas distantes em torno do sol	1950	Oort
Cometas estão para além da atmosfera	1577	Brahe
Cometas seguem as leis de Newton, alguns regressam	1705	Halley
A terra como uma esfera	Cerca de -500	Escola de Pitágoras
Circum-navegação da terra	1520	Magalhães
Primeiro mapa nacional completamente triangulado	Iniciado 1744	Cassini de Thury
Longitude ao nível do mar: o cronómetro	1761	Harrison
Satélite artificial da terra:		
—teoria	1687	Newton
—realização	1957	URSS
O tempo como um padrão geral	1686 a 1740s	Halley, Hadley & D'Alembert
Estimativa do peso e altura da atmosfera	1640s	Pascal, Torricelli
Descrição dos ciclones	1492	Colombo
Papel da glaciação no passado	1830s	Bernhardi, Hitchcock & Agassiz
Fotografias sistemáticas da terra vista do espaço	1972	Landsat, NASA
10^5 metros		
Everest é a montanha mais alta	1852	levantamento topográfico da Índia
Fossas do Pacífico sondadas	1875	U.S.S. *Tuscarora*
Domesticação do trigo	Cerca de -8000	da Palestina às Montanhas Zagros
Primeiras cidades	Cerca de -4000	Vale do Eufrates
Cabos de pontes feitos de aço	1883	John & Washington Robbin
Primeiro arranha-céus, Chicago	1890	Burnham & Root
10^0 metros		
Primeiro uso do fogo	Antes de -10^6	Primeiros humanos em Àfrica
Sistemática das espécies animais, vegetais e minerais	1740	Lineu
Origem das espécies	1859	Darwin
Logaritmos	1594	Napier

Fotografia 'instantânea' (com placas rápidas de gelatina seca)	1880	Burgess & Kenett, Bennett
Microcomputador	1972	Intel Corp.
Circulação do sangue	1628	Harvey
Microscópio óptico	Cerca de 1610	Vários incluindo Galileu
Ligações capilares	1661	Malpighi
Observação das células vermelhas do sangue	1674	Van Leeuwenhoek
Células como característica da vida	1839	Schwann
10^{-5} metros		
Observação do núcleo da célula	1831	Brown
DNA:		
—isolado	1864	Miescher
—transporta informação hereditária	1944	Avery & McLeod
—Dupla hélice	1953	Watson & Crick
Observação de bactérias e protozoários no microscópio	1675	Van Leeuwenhoek
Culturas de bactérias	1881	Koch
Linfócitos como parte do sistema imunológico humano	1882	Pasteur, Metchnikoff
Lentes para feixes de electrões	1925	H. Bush
Microscópio electrónico de varrimento	1938 1953	Von Ardenne, McMullan & Oatley
Microscópio electrónico de transmissão	1931	Knoll & Ruska
Enzima isolada como proteína cristalizada	1926, 1930	Sumner, Northrup
Electricidade são partículas e as forças químicas são eléctricas	1881	Helmholtz
Descoberta do electrão, pesado (relativamente ao hidrogénio) e nomeado	1897	J. J. Thomson
Hidrogénio reconhecido como o mais leve dos átomos; pesos atómicos	1858	Cannizzaro
Compostos químicos e a sua natureza atómica	1810	Dalton
Ligações específicas para átomos específicos	1852	Frankland
Visualização de moléculas em anel	1865	Kekulé
Modelização de formas moleculares tri-dimensionais	1874	Van't Hoff & Le Bel
10^{-10} metros		
Modelo molecular dos sólidos, líquidos e gases	1870s	Maxwell, van der Waals
A tabela periódica:		
—química	1869	Mendeleef
—primeira teoria física	1922	Bohr
Teoria atómica do átomo: espectros do hidrogénio, primeira aproximação quântica	1913	Bohr

Mecânica quântica	1925	Heisenberg, Dirac, Schrödinger
Teoria quântica das ligações químicas	1930s	Heitler & London, Pauling
Raios X	1896	Röntgen
Raios X emitidos pelas camadas internas dos átomos: o número atómico	1914	Moseley
Difracção de raios X por redes cristalinas	1912	von Laue
Descoberta e medida do núcleo atómico	1911	Rutherford
Regularidades dos espectros ópticos dos átomos	1884	Balmer
Protão: iões do hidrogénio	1912	J.J Thomson
Identificação de isótopos	1913	Soddy
O neutrão	1932	Chadwick
O positrão:		
—previsão	1928	Dirac
—descoberta	1932	Anderson
O núcleo formado por neutrões e protões	1932	Heisenberg
O neutrino:		
—previsão	1930	Pauli
	1934	Fremi
—detectado experimentalmente	1956	Reines & Cowen
O mesão π:		
—previsto	1935	Yukawa
—descoberto	1946	Powell
Aceleradores de protões	1930	Lawrence
	1946	McMillan, Veksler
Famílias de partículas elementares: mesões, hiperiões …	1960s	
	1970s	
10^{-16} metros		
Descoberta dos quarks	1980s	

I

Erros e Regressão Linear

A determinação da melhor linha recta que traduz a variação de um conjunto de pontos experimentais é um problema estatístico relativamente simples que conduz a um conjunto de expressões conhecidas que nos dão os valores da inclinação, ordenada na origem e erros nestes parâmetros. Em seguida apresenta-se, além das expressões que permitem calcular aqueles parâmetros a partir dos dados experimentais, um pequeno resumo sobre a propagação de erros.

I.1 Propagação de erros

Dados dois números com os respectivos erros:

$$x \pm \Delta x$$
$$y \pm \Delta y$$

qualquer função

$$z = f(x,y)$$

vem afectada de um erro Δz que se calcula da seguinte maneira:

$$(\Delta z)^2 = (\Delta x)^2 \left(\frac{df}{dx}\right)^2 + (\Delta y)^2 \left(\frac{df}{dy}\right)^2$$

Nota: Δx e Δy devem ser pequenos e x e y não devem estar correlacionados.

Tabela 9: Propagação de erros para várias funções

Função	*Fórmula*
$x + y$ e $x - y$	$(\Delta z)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2$
x/y e xy	$(\Delta z/z)^2 = (\Delta x/x)^2 + (\Delta y/y)^2$
x^n	$(\Delta z/z) = n(\Delta x/x)$
$\ln x$	$\Delta z = \Delta x/x$
$\log_{10} x$	$\Delta z = (1/\ln 10)(\Delta x/x)$
e^x	$\Delta z = e^x \Delta x$
$\sin x$	$\Delta z = \cos x(\Delta x)$
$\cos x$	$\Delta z = -\sin x(\Delta x)$

I.2 A regressão linear

Quando temos pares de valores experimentais (x, y), e temos motivos para supor que estejam relacionados linearmente, pretendemos determinar qual é a melhor recta que se ajusta a esses resultados:

$$y = mx + c$$

Em geral teremos de considerar um dos três casos seguintes:

1. Cada ponto no gráfico corresponde a uma única medida de x e y. Não há, portanto, qualquer conhecimento do erro em ambos os valores (σ_x e σ_y são desconhecidos). É uma situação muito vulgar, embora não seja demais lembrar que a repetição de medidas só pode ser benéfica. (Este caso é que se encontra programado nas calculadoras com “regressão linear”)

2. Para cada valor de x, repetem-se várias medidas para y de modo que podemos calcular o valor de σ_y em cada ponto. O valor de cada σ_y é, em geral, diferente para cada ponto. Este caso também se aplica quando o erro na variável x é muito pequeno quando comparado com o erro em y.

3. É o caso mais geral em que temos, para cada ponto, um erro σ_x e σ_y de dimensões comparáveis.

Caso 1

$$m = \frac{N\sum xy - \sum x \sum y}{\Delta}$$

$$c = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{\Delta}$$

com

$$\Delta = N\sum x^2 - (\sum x)^2$$

Pode-se calcular valores para os erros em m e c a partir da dispersão dos valores em torno da recta determinada:

$$\sigma_m^2 = \frac{\sum (y - mx - c)^2}{\Delta}$$

$$\sigma_c^2 = \frac{\sum (y - mx - c)^2 \sum x^2}{\Delta}$$

Caso 2

$$m = \frac{\sum w \sum wxy - \sum wx \sum wy}{\Delta}$$

$$c = \frac{\sum wy \sum wx^2 - \sum wx \sum wxy}{\Delta}$$

com

$$\Delta = \sum w \sum wx^2 - (\sum wx)^2$$

$$w = \left(\frac{1}{\sigma_{y_i}}\right)^2$$

Os erros vêm dados por

$$\sigma_m = \left(\frac{\sum w}{\Delta}\right)^{1/2}$$

$$\sigma_c = \left(\frac{\sum wx^2}{\Delta}\right)^{1/2}$$

Caso 3

As expressões são as mesmas que para o **caso 2** mas o peso de cada ponto é dado por:

$$w_i = \left[\frac{1}{\sigma_{y_i}^2 + m^2\sigma_{x_i}^2}\right].$$

Podemos ver que esta expressão nos confronta com um problema sério, é preciso saber qual é o valor da inclinação *m*, para calcular *w*, mas primeiro precisamos deste último para calcular o primeiro—eis um exemplo do problema do ovo e da galinha. Felizmente existe o *método das aproximações sucessivas*, ou seja, primeiro arranjamos um valor aproximando para *m*, calculamos os valores de *w*, usamos estes para calcular um melhor valor para *m*, e assim sucessivamente até se obter um valor de *m* que não varie dentro da precisão requerida. Embora não seja óbvio que o valor de *m* deve convergir, quase sempre converge, e quanto mais perto do valor final se partir mais rápida será essa convergência.

Referências

Almeida, Guilherme de, *Sistema Internacional de Unidades (SI), Crandezas e Unidades Fisicas*, 2ª Ed., Plátano Editora, Lisboa, 1997.

Birge, R. T. e Menzel, D. H. 1931, *Phys. Rev.*, **37**, 1669.

Cohen, E. R. e Taylor, B. N. 1986, *J. Res. of the National Bureau of Standards*, **92**, 85.

Cook, A. H. 1967a, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, **A261**, 211,

1967b, *Contemporary Physics*, **8**, 251.

Dicke, R. H. 1961, *Scientifica American*, **205**, 6, 84.

Dunnington, F. G. 1937,*Phys. Rev.* **52**, 475

Froome K. D. 1954, *Proc. Roy. Soc.* **A223**, 195,

1958, *Proc. Roy. Soc.* **A247**, 109.

Matthews, Robert A.J. 1997, *Scientific American*, April 1997, 72

Millikan, R. A., 1917, *Phil. Mag.*, **34**, 1

Plimpton, S. J. e Lawton, W. E. 1936, *Phys. Rev.* **50**, 1066.

Pons e Fleishmann, 1989, *Nature*,

Reynolds, O. 1883, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, **174**, 935.

Rayleigh, Lord e Ramsay, W. 1985, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, **186**, 187.

Roll, P. G. Krotkov, R. e Dicke, R. H. 1964, *Annals of Physics*, **26**, 442.

Rosser, W. G. V. 1964, *An Introduction to the Theory of Relativity*, Butterworths

Urey, H. C., Brickwedde, F. G. e Murphy, G. M. 1932, *Phys. Rev.*, **39**, 864.

Wood, A. 1940, *Acoustics*, Blackie & Son.

Smith, C. J. 1960, *General Properties of Matter*, 2nd ed., Arnold.

Thomson, J. J. 1987,*Phil. Mag.*, Ser. 5, **44**, 293.

Índice de Autores

Índice de Assuntos

E

F

G

N

O

P